



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ**

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

**PROBLEMATIKA R-MATERIÁLU V ASFALTOVÝCH  
SMĚSÍCH**

THE ISSUE OF RECLAIMED ASPHALT IN ASPHALT MIXTURES

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

DIPLOMA THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Dominik Zima**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. ONDŘEJ DAŠEK, Ph.D.**

**BRNO 2018**



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav pozemních komunikací

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Dominik Zima
Název	Problematika R-materiálu v asfaltových směsích
Vedoucí práce	Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2017
Datum odevzdání	12. 1. 2018

V Brně dne 31. 3. 2017

---

doc. Dr. Ing. Michal Varaus  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

Předané vzorky zkušebních materiálů

Zkušební normy pro asfaltové směsi za horka řady ČSN EN 12697

ČSN EN 13108-1 Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 1: Asfaltový beton

ČSN EN 13108-8 Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 8: R-materiál

Buttlar W., Rebholz F. E., Nassar W.: Detection of Recycled Asphalt Pavement (RAP) in Bituminous Mixtures, Project IA-H1, FY 02, Report No. ITRC FR 02-2, Illinois Transportation Research Center, 2004

Literatura z internetu

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Diplomová práce je zaměřena na problematiku používání R-materiálu v hutněných asfaltových směsích. V úvodní rešeršní části bude zpracován přehled dosavadních poznatků o využívání R-materiálu v hutněných asfaltových směsích a o možnostech zjišťování přítomnosti R-materiálu v asfaltových směsích. V praktické části práce bude proveden návrh asfaltové směsi bez R-materiálu a s R-materiálem a budou stanoveny vybrané parametry těchto asfaltových směsí. Dále bude na těchto směsích ověřena laboratorní metoda, pomocí které by bylo možné prokázat přítomnost R-materiálu v asfaltové směsi.

## STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

---

Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.  
Vedoucí diplomové práce

## **ABSTRAKT**

V teoretické části této diplomové práce je popsána reologie asfaltových pojiv, stárnutí asfaltových pojiv, možnosti oživení asfaltového pojiva rejuvenátory a zahraniční laboratorní metody rozeznávání přítomnosti R-materiálu v asfaltových směsích. Dále jsou popsány empirické a dynamické zkoušky asfaltových směsí a pojiv. Praktická část této práce se zabývá využitím všech popsaných zkoušek z pohledu rozpoznání přítomnosti R-materiálu v asfaltových směsích. Získaná data a rešeršní část jsou zanalyzovány. Na tomto základě jsou navrženy funkční a empirické zkoušky pro rozpoznání přítomnosti R-materiálu v asfaltových směsích. Tyto metody jsou ověřeny na referenčních vzorcích.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

R-materiál, asfaltové pojivo, asfaltová směs, reologie, dynamický smykový reometr, komplexní smykový modul, dynamická viskozita, stárnutí, rejuvenátor, penetrace jehlou, bod měknutí, recyklace asfaltových směsí, recyklace netuhých vozovek, vrstevnatá struktura, rozpoznání R-materiálu.

## **ABSTRACT**

The theoretical part of this thesis describes the rheology of bituminous binders, aging of asphalt binders, recovery of asphalt binder by means of rejuvenators and foreign laboratory methods of recognizing of recycled asphalt pavement presence in asphalt mixtures. The following describes an empirical and functional tests of bituminous mixture and bituminous binder. Practical part of this thesis deals with the usage of all the described tests in terms of the detection of recycled asphalt pavement presence in bituminous mixture. These data and the literature review are analyzed. On this basis, functional and empirical tests are designed to methods for detection of recycled asphalt pavement presence in bituminous mixture. These methods are verified on reference samples.

## **KEYWORDS**

Recycled asphalt pavement (RAP), bituminous binder, bituminous mixture, rheology, dynamic shear rheometer, complex shear modulus, dynamic viscosity, ageing, rejuvenator, needle penetration, softening point, recycling of asphalt mixtures, recycling of flexible pavements, layered system, detection of recycled asphalt pavement.

Bc. Dominik Zima *Problematika R-materiálu v asfaltových směsích*. Brno, 2017. 109 s., 109 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.

# PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne .....

---

Bc. Dominik Zima  
autor práce

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval především vedoucímu své diplomové práce Ing. Ondřeji Daškovi, Ph.D., za poskytnutí mnoha rad a trpělivé vedení při tvorbě diplomové práce. Dále děkuji Ing. Tomáši Koudelkovi za jeho ochotu a pomoc při volbě vhodných rešeršních podkladů a poskytnutí referenčních vzorků pro diplomovou práci. Za zkušební vzorky a spolupráci při měření děkuji Ing. Ivě Krčmové. Děkuji také Ing. Radce Matuszkové za umožnění provádět měření v nadstandardní časový rámec. Dále bych rád poděkoval Pavlu Strakovi a Matěji Šafránkovi za pomoc při laboratorních měřeních.

## Obsah

1	ÚVOD.....	12
2	CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE .....	13
3	REŠERŠE LITERATURY.....	15
3.1.	Předmluva .....	15
3.2.	Reologie .....	15
3.2.1.	Viskozita .....	15
3.2.2.	Viskózní materiály .....	16
3.2.3.	Elasticita .....	17
3.2.4.	Elastické materiály .....	17
3.2.5.	Viskoelastický materiál .....	18
3.2.6.	Komplexní smykový modul.....	19
3.2.7.	Fázový úhel .....	19
3.3.	Stárnutí asfaltových pojiv.....	20
3.3.1.	Termooxidační stárnutí .....	20
3.3.2.	Destilační stárnutí .....	21
3.3.3.	Exudační stárnutí (migrační procesy).....	21
3.3.4.	Strukturální stárnutí .....	21
3.4.	Černá skála .....	22
3.5.	Vrstevnatost pojiva ve směsích obsahujících R-materiál .....	26
3.6.	Rejuvenátor .....	28
3.7.	Zjišťování přítomnosti R-materiálu v asfaltové směsi .....	29
3.7.1.	Metodika simulace změn vlivem výroby.....	29
3.7.2.	Metoda částečné extrakce .....	30
3.7.3.	Metoda pálení v peci.....	31
3.7.4.	Metoda reologické analýzy pojiva .....	32
3.8.	Shrnutí .....	35
4	POUŽITÉ KONVENČNÍ ZKUŠEBNÍ METODY.....	36
4.1.	Stanovení zrnitosti podle ČSN EN 933-1 .....	36
4.1.1.	Podstata metody.....	36
4.1.2.	Postup zkoušky .....	36
4.1.3.	Výpočet.....	36



4.2.	Stanovení obsahu pojiva ve směsi ČSN 73 6160 .....	37
4.3.	Výroba Marshallových těles podle ČSN EN 12697-30 .....	37
4.4.	Stanovení objemové hmotnosti z asfaltových zkušebních těles podle ČSN EN 12697-6+A1 .....	38
4.4.1.	Postup zkoušky .....	38
4.4.2.	Výpočet.....	38
4.5.	Stanovení maximální objemové hmotnosti podle ČSN EN 12697-5+A1 ..	39
4.5.1.	Postup zkoušky .....	39
4.5.2.	Výpočet.....	40
4.6.	Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí podle ČSN EN 12697-8.....	40
4.6.1.	Výpočet.....	40
4.7.	Extrakce asfaltového pojiva z asfaltové směsi podle ČSN EN 12697-1 ....	41
4.7.1.	Postup extrakce.....	41
4.8.	Zpětná destilace asfaltového pojiva podle ČSN EN 12697-3.....	42
4.8.1.	Postup destilace asfaltového pojiva.....	43
4.9.	Stanovení penetrace jehlou podle ČSN EN 1426.....	45
4.9.1.	Postup zkoušky .....	45
4.10.	Stanovení bodu měknutí podle ČSN EN 1427 .....	46
4.10.1.	Postup zkoušky .....	46
4.11.	Stanovení komplexního smykového modulu a fázového úhlu v DSR podle ČSN EN 14770.....	48
4.11.1.	Postup zkoušky .....	48
4.12.	Stanovení dynamické viskozity pomocí DSR podle ČSN EN 13702 .....	50
5	POUŽITÉ INOVATIVNÍ ZKUŠEBNÍ METODY ROZPOZNÁNÍ R-MATERIÁLU V ASFALTOVÝCH SMĚSÍCH .....	51
5.1.	Metoda geologické analýzy.....	51
5.2.	Metoda černé skály.....	51
5.3.	Metoda postupné extrakce.....	52
5.3.1.	Princip metody .....	52
5.3.2.	Postup metody .....	53
5.3.3.	Vyhodnocení metody.....	54
6	PRAKTICKÁ ČÁST .....	55

6.1. Finální návrh zkušebních metod predikující přítomnost a množství R-materiálu v asfaltových směších .....	55
6.1.1. Metoda postupné extrakce bez použití DSR .....	55
6.1.2. Metoda postupné extrakce s možností použití DSR.....	57
6.2. Použité materiály .....	60
6.3. Vyhodnocení konvenčních zkušebních postupů pro detekci přítomnosti R-materiálu .....	61
6.3.1. Vyhodnocení zrnitosti podle ČSN EN 933-1 .....	61
6.3.2. Vyhodnocení mezerovitosti asfaltových směsí podle ČSN EN 12697-8	62
6.3.3. Vyhodnocení objemové hmotnosti z asfaltových zkušebních těles podle ČSN EN 12697-6+A1 .....	62
6.3.4. Vyhodnocení maximální objemové hmotnosti podle ČSN EN 12697-5+A1	63
6.3.5. Vyhodnocení obsahu pojiva ve směsi.....	65
6.3.6. Vyhodnocení penetrace jehlou podle ČSN EN 1426.....	65
6.3.7. Vyhodnocení bodu měknutí podle ČSN EN 1427 .....	66
6.3.8. Vyhodnocení komplexního smykového modulu a fázového úhlu v DSR podle ČSN EN 14770 .....	67
6.3.9. Vyhodnocení dynamické viskozity pomocí DSR podle ČSN EN 13702	69
6.3.10. Shrnutí a doporučení .....	71
6.4. Vyhodnocení optických metod na rozpoznání přítomnost R-materiálu	72
6.4.1. Metoda geologické analýzy .....	72
6.4.2. Metoda černé skály.....	76
6.4.3. Shrnutí.....	77
6.5. Vyhodnocení metody postupné extrakce .....	78
6.5.1. Vyhodnocení penetrace jehlou podle ČSN EN 1426.....	78
6.5.2. Vyhodnocení bodu měknutí podle ČSN EN 1427 .....	80
6.5.3. Vyhodnocení dynamické viskozity pomocí DSR podle ČSN EN 13702	81
6.5.4. Vyhodnocení komplexního smykového modulu a fázového úhlu v DSR podle ČSN EN 14770 .....	83
6.5.5. Shrnutí výsledků postupné extrakce.....	93

6.6.	Shrnutí metody postupné extrakce – diskuze .....	94
6.6.1.	Asfaltová směs bez přidání R-materiálu .....	94
6.6.2.	R-materiál .....	96
6.6.3.	Asfaltová směs s přidáním R-materiálem.....	98
6.6.4.	1.extrakce .....	99
6.6.5.	2. extrakce.....	100
6.6.6.	3. extrakce.....	101
6.6.7.	Doporučení změny provádění postupné extrakce .....	102
7	DOPORUČENÍ .....	103
8	ZÁVĚR .....	104
9.	POUŽITÁ LITERATURA.....	105
10.	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	107
11.	SEZNAM TABULEK .....	107
12.	SEZNAM GRAFŮ .....	108
13.	SEZNAM MATEMATICKÝCH VZORCŮ .....	109

# 1 ÚVOD

Recyklace vrstev netuhých vozovek, je dnes již zavedenou praxí. Nejen s ohledem na životní prostředí si uvědomujeme, že recyklovat asfaltové vrstvy je vlastně nutnost a že tato recyklace navíc skýtá četné výhody.

Využívání asfaltového recyklátu tzv. R-materiálu, v sobě nese spoustu pozitivních aspektů. Ekologický aspekt je společnosti dobře znám, úspora a recyklace ropných produktů, jakým je asfaltové pojivo, má pozitivní vliv na šetření světového bohatství. Silniční stavitelství snahou, recyklovat staré nevyhovující vozovky, významně přispívá tuto problematiku řešit. Ekonomický aspekt je nesporný, náklady jsou při výrobě nových asfaltových směsí výrazně sníženy. Šetříme množství potřebovaného asfaltového pojiva a kameniva. Dnes, kdy je hlavním veřejně preferovaným kritériem výběru dodavatele, cena provedeného díla, se recyklace ukazuje jako nutná.

Bohužel s tímto ekonomickým aspektem, vznikají i negativní přístupy k návrhu a výrobě nových asfaltových směsí, využívající materiály vzniklé při recyklaci netuhých vozovek. Použití R-materiálu je nutné navrhovat, jednak v souladu s platnými normovými předpisy, tak s obecně známými návrhovými pravidly.

Pojivo obsažené v R-materiálu je obvykle značně zestárlé, a proto má výrazně vyšší tuhost, a tudíž i křehkost. Tyto vlastnosti částečně přebírá i směs, která je s příměsí R-materiálu vyrobena. Tvrdost výsledné směsi zvyšuje pravděpodobnost vzniku mrazových trhlin. Na druhou stranu je již obecně známo, že R-materiál ve směsi pozitivně ovlivňuje některé mechanické vlastnosti. Z těchto důvodů je potřeba, k návrhu a výrobě asfaltových směsí s R-materiálem přistupovat zodpovědně a využívat vlastností R-materiálu správně.

## 2 CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cíle diplomové práce vycházejí z problematiky návrhu a užití asfaltových směsí s příměsí R-materiálu, vlastností R-materiálu a možností jeho rozpoznávání v asfaltových směších. Ekonomický aspekt má na návrh netuhých vozovek zásadní vliv. Platné státní normy přesně určují pravidla návrhu vozovek s přidáním R-materiálu včetně možného dávkování R-materiálu pro jednotlivé asfaltové směsi. Parametry pro maximální možné množství přidaného R-materiálu se řídí jak zatížením komunikace, tak typem vrstvy. V dnešní době jsou však již známy metodiky výrob asfaltových směsí s vyšším obsahem R-materiálu, než povoluje státní norma. Směsi vyrobené podle těchto metodik a receptur mají často stejné nebo i lepší mechanické vlastnosti ve srovnání s konvenčně vyráběnými asfaltovými směsmi. Bohužel i v této oblasti se vyskytují případy, kdy jsou směsi vyráběny nevhodně, a tím zásadně snižují životnost a funkčnost netuhých vozovek.

Cílem této diplomové práce je nalézt metodu, jak ve směsi odhalit přítomnost R-materiálu nebo přímo určit jeho množství, a tím umožnit zpětnou kontrolu složení asfaltových směsí.

V rešeršní části se diplomová práce zabývá pochopením reologických vlastností asfaltových pojiv (viskoelastického materiálu), jejich změnami v čase a tzv. ožíváním asfaltových pojiv (kompenzace fyzikálně chemických změn vlastností pojiva v čase). V další části se zabývá analýzou vybraných metod na diagnostiku R-materiálu, vyvinutých ve světě, které jsou popsány v odborné literatuře.

Následuje popis všech zkušebních metod použitých v této diplomové práci.

V praktické části se diplomová práce zabývá systematickou analýzou obecně používaných zkušebních metod na určování vlastností asfaltových směsí a asfaltových pojiv, a to v souvislosti s potenciálem využití na rozpoznání přítomnosti R-materiálu v asfaltových směších. Následuje část diplomové práce, která kombinuje zjištění z rešeršní části a úvodu praktické části. Účelem tohoto propojení zjištění je nalézt nejvhodnější poznatky z měření konvenčními zkušebními metodami, pro vyvinutí nových zkušebních metod predikujících přítomnost R-materiálu v asfaltových směších.

Následuje vyvinutí těchto metod. Popsání metodiky jejich vzniku, principu a rozsah použití. Závěrem podrobuji tyto zkušební metody testování na referenčních vzorcích. Po domluvě s vedoucím práce nebyly asfaltové směsi vyráběny v laboratoři, ale asfaltové směsi se známým obsahem R-materiálu byly odebrány na obalovnách. K tomuto kroku se přistoupilo to z toho důvodu, že

panovala obava, že vlastnosti asfaltové směsi by mohly být ovlivněny laboratorní výrobou, která je odlišná od výroby asfaltové směsi na obalovně.

## 3 REŠERŠE LITERATURY

### 3.1. Předmluva

Pro účely této práce byl zásadní systematický postup návaznosti řešení rešerše. Na úvod bylo zapotřebí pochopit fyzikální chování viskoelastických materiálů, dále vliv času na chování asfaltového pojiva a vlastnosti R-materiálu. Dále byly studovány používané metody oživení pojiva obsaženého v R-materiálu. Závěr rozebírá nalezené zahraniční zkušební metody pro identifikaci R-materiálu v asfaltových směsích.

### 3.2. Reologie

Reologie je nauka zabývající se deformací a tokem. Název reologie je odvozen z řeckého slova „rheos“ znamenající „řeka, tok či proudění“. Reologie je tedy věda o toku látek. Reologie se nevěnuje pouze tokovým chováním kapalin, ale také deformaci tuhých těles, které za určitých okolností (čas) rovněž tečou. Základní veličinou v reologii, která charakterizuje tokové chování, je viskozita. Ta určuje míru vnitřního odporu materiálů vůči vnějšímu zatížení, tedy odpor proti toku. Viskozita je závislá na druhu zatížení a potom rozlišujeme mezi smykovou a elongační viskozitou. [1]

#### 3.2.1. Viskozita

V praxi existuje několik způsobů, jak definovat viskozitu materiálů. Zde popisují dva typy viskozity, a to viskozitu dynamickou a kinematickou. Viskozita je závislá na fyzikálně-chemické struktuře látky, teplotě, tlaku, době zatížení a smykové rychlosti.

Pokud budeme materiál zatěžovat smykovou silou a materiál bude umístěn mezi dvěma rovnoběžnými deskami, kde se jedna deska bude vzhledem k druhé pohybovat rovnoměrným přímočarým pohybem, budeme měřit dynamickou viskozitu. Ta je definována Newtonovu rovnicí (1):

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$$

Newtonova rovnice [1](1)

$\tau$  – smykové napětí [Pa]

$\eta$  – dynamická viskozita [Pa s]

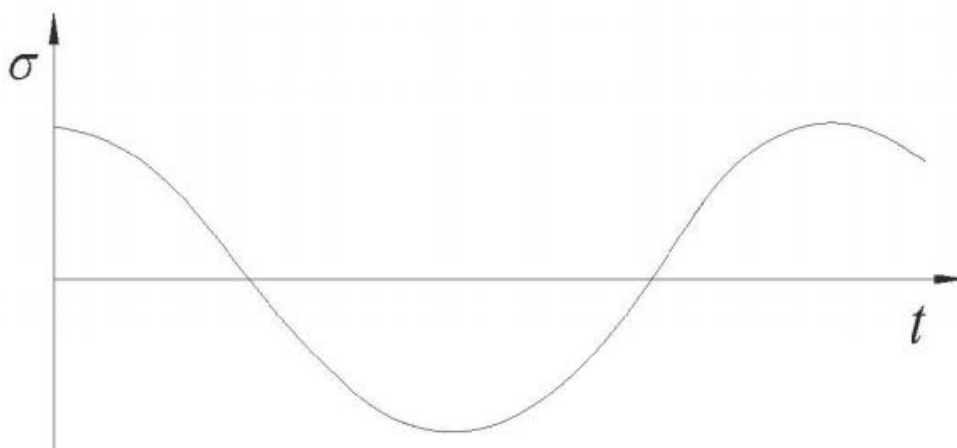
$\dot{\gamma}$  – rychlostní gradient neboli smyková rychlost

Dalším možností, jak popsat viskozitu, je definovat ji pomocí kinematické viskozity, která uvádí podíl dynamické viskozity vzhledem k hustotě kapaliny. Takto lze zapsat materiál, který se nechová jako newtonovská kapalina. Závislost napětí na rychlosti smykové deformace není lineární. [1][2]

### 3.2.2. Viskózní materiály

Ideálně viskózní materiál je druh materiálu, u kterého se neakumuluje žádná energie dodaná soustavě při zatížení. Veškerá energie vložená v materiálovém vzorku při jeho zatížení se disipuje v teplo. Nedochází k žádnému zpětnému využití vložené mechanické energie při odlehčení tohoto vzorku. Napětí a poměrná deformace nejsou ve fázi u těchto materiálů. Napětí předbíhá poměrnou deformaci, přičemž fázový posun mezi těmito dvěma veličinami je  $\delta = \pi/2$ . [1]

Dynamické testy viskozity se provádí ve viskozimetrech nebo na rotačních reometrech s geometrií kužel – deska. Viskoelastické funkce měříme v dynamickém režimu, kdy se kužel pootáčí ustálenou rychlostí oproti desce (obr. 3.1). [2]



Obr. 3.1 Napětíová odezva viskoelastického materiálu při dynamických experimentech [3]



### 3.2.3. Elasticita

Elasticita nebo také pružnost je základní vlastnost materiálů, díky které jsme schopni relativně přesně navrhovat stavební konstrukce. Elasticita definuje vratnou deformaci materiálu zatíženého vnějšími silami. Tímto jevem se zabýval Robert Hooke, který objevil zákon pružnosti, po něm pojmenovaný jako Hookův zákon.

Tento zákon nám říká, že normálové napětí je přímo úměrné relativnímu prodloužení. Vypočítá se z následujícího vztahu (2). [3]

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

*Hookův zákon [3] (2)*

$\sigma$  [Pa] – normálové napětí

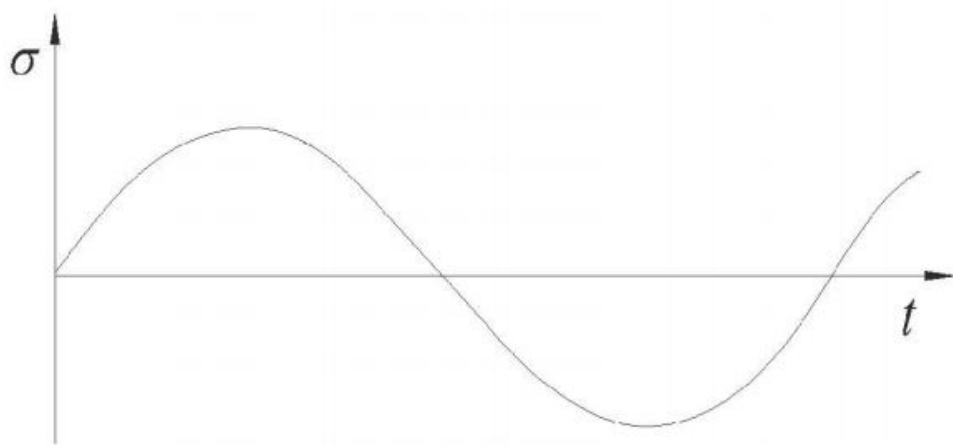
$\varepsilon$  [nemá jednotku] – relativní prodloužení

$E$  [Pa] – konstanta úměrnosti = Youngův modul pružnosti (modul pružnosti v tahu)

Youngův modul pružnosti je materiálová konstanta, tj. veličina charakteristická pro danou látku. Vypovídá o její pružnosti a možnosti deformace. Čím je hodnota modulu vyšší, tím vyšší napětí je potřebné na dosažení odpovídající deformace. [3]

### 3.2.4. Elastické materiály

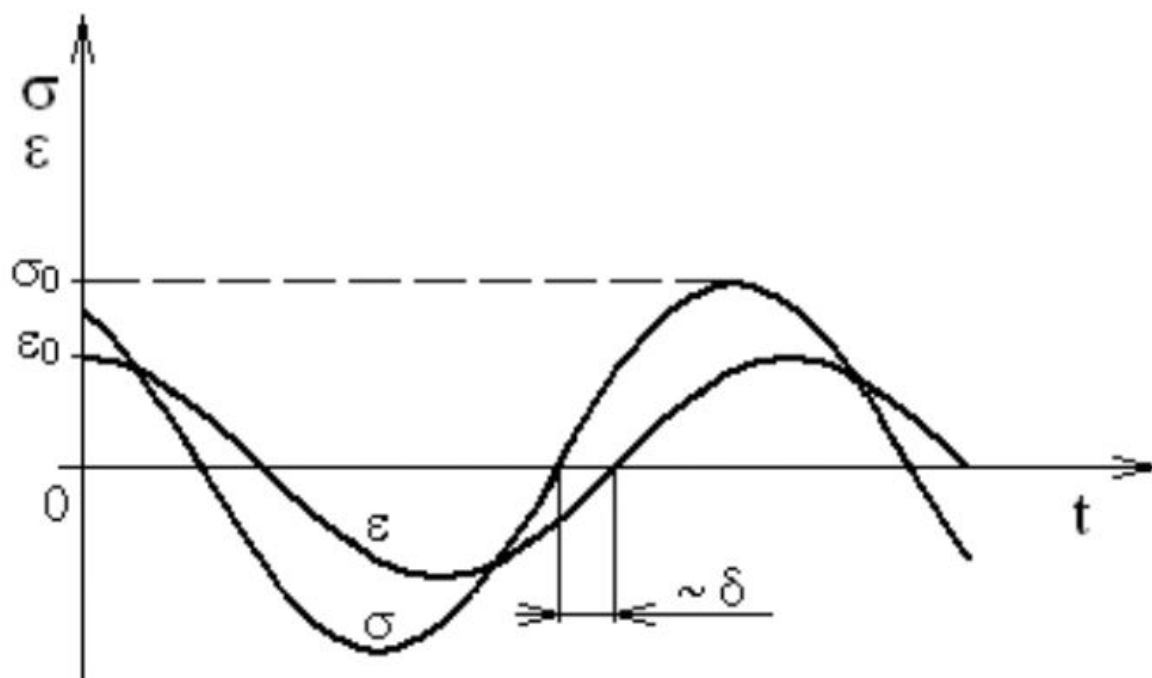
Ideálně elastický materiál je materiál, u kterého veškerá energie akumulovaná v materiálovém vzorku při jeho zatížení je zpětně využita při odlehčení tohoto vzorku. U těchto materiálů nedochází k žádné disipaci vložené mechanické energie v teplo. Z tohoto důvodu jsou napětí a poměrná deformace ve fázi a fázový posun  $\delta$  mezi napětím a poměrnou deformací je nulový ( $\delta = 0$ ). Dále je zřejmé, že napětí a poměrná deformace se mění harmonicky se stejnou kruhovou frekvencí  $\omega$ . U ideálně elastických materiálů platí Hookův zákon a závislost mezi napětím a poměrnou deformací lze vyjádřit jako periodickou funkci času  $t$  (obr. 3.2). [2][3]



Obr. 3.2 Napěťová odezva ideálně elastického materiálu při dynamických experimentech [3]

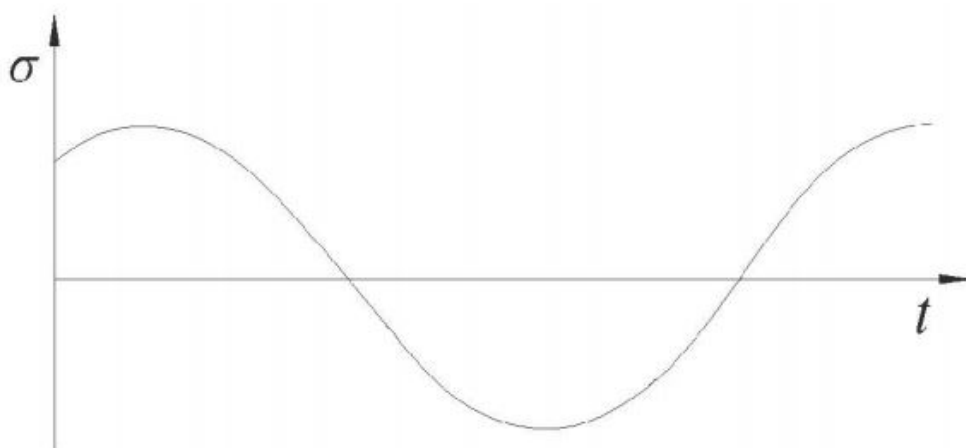
### 3.2.5. Viskoelastický materiál

Viskoelastický materiál je takový druh materiálu, který nesplňuje vlastnosti elastických ani viskózních materiálů. U viskoelastického materiálu se část vložené mechanické energie při harmonickém namáhání využije při odlehčení tohoto materiálu, zbytek se disipuje. Poměrná deformace je zpožděna za vneseným napětím, přičemž fázový posun mezi těmito dvěma veličinami leží v intervalu  $\delta = (0, \pi/2)$ . Tuto závislost můžeme vidět na následujícím obrázku (obr. 3.3). [2][3]



Obr. 3.3 Časová závislost napětí a poměrné deformace při harmonickém namáhání u viskoelastických materiálů [2]

Protože závislost mezi napětím a poměrnou deformací je nelineární, neplatí Hookův zákon u viskoelastických materiálů. Celková napěťová odezva viskoelastického materiálu je tedy dána součtem elastické složky a viskózní složky. [2][3]



Obr. 3.4 Napěťová odezva viskoelastického materiálu při dynamických experimentech [3]

### 3.2.6. Komplexní smykový modul

Jedná se o veličinu, která charakterizuje viskoelastický materiál při harmonickém namáhání. Reálná složka komplexního smykového modulu charakterizuje pružnost materiálů  $G'$  (dynamická složka), imaginární složka tlumicí vlastnosti materiálů  $G''$  (ztrátový modul). Obě složky jsou funkcí frekvence kmitání při harmonickém namáhání a komplexní smykový modul je dán jejich vektorovým součtem  $G^*$ . [3]

### 3.2.7. Fázový úhel

Hodnoty fázového úhlu  $\delta$  a komplexního smykového modulu  $G^*$  asfaltového pojiva jsou silně závislé na teplotě a frekvenci. Při daných podmínkách tvoří sdružené hodnoty, které lze znázornit jako vektor nebo komplexní číslo s elastickou a viskózní složkou. Pokud bude asfaltové pojivo namáháno nízkými frekvencemi nebo za vysokých teplot, bude komplexní modul nízký a fázový úhel větší. To znamená, že se pojivo chová jako kapalina. Se snižující se teplotou nebo rostoucí frekvencí se asfalt stává tužší a elastičtější. Z toho plyne, že hodnoty  $G^*$  porostou a fázový úhel se bude blížit k hodnotě 0. Graf znázorňující závislost komplexního smykového modulu a fázového úhlu při různých teplotách a frekvencích zatěžování se nazývá Blackův diagram. [5]

### 3.3. Stárnutí asfaltových pojiv

Stárnutí asfaltových pojiv je fyzikálně chemický proces měnící reologické vlastnosti asfaltového pojiva. Díky působení tepla, vzdušného kyslíku a ultrafialového záření dochází ke změnám vlastností během pracovní fáze asfaltové vrstvy.

K fyzikálně chemickým změnám asfaltových pojiv dochází při výrobě asfaltové směsi, dále při skladování, zpracování, dopravě, pokládce a během jejich předpokládané životnosti.

Rozlišujeme čtyři druhy stárnutí: termooxidační, destilační, migrační a strukturální. Stárnutí v jakékoliv fázi použití asfaltového pojiva má zásadní vliv na jeho užité vlastnosti (odolnost proti trhlinám, plastickým deformacím, moduly pružnosti, ...). Díky laboratorním zkouškám je potvrzeno, že vlivem stárnutí dochází u asfaltových pojiv ke zvýšení komplexního smykového modulu a poklesu fázových úhlů. Tento fakt má za následek snížení plastických vlastností, materiál vlivem stárnutí tvrdne a na jeho porušení je nutné vynaložit větší smykovou sílu. To má za následek snížení odolnosti proti tvorbě trvalých deformací. Důsledkem snížení plasticity pojiva je zvýšení křehkosti za nízkých teplot. Asfaltová směs reaguje křehčeji na smyková zatížení, tím se zhoršují únavové charakteristiky a směs se stává náchylnější k tvorbě nízkoteplotních trhlin. [4] [6]

#### 3.3.1. Termooxidační stárnutí

Termooxidační stárnutí asfaltového pojiva je soubor chemických pochodů, které jsou závislé nejvíce na teplotě a přístupu vzdušného kyslíku k pojivu (velikost kontaktní plochy se vzduchem). Přístup kyslíku vede k zabudování atomů kyslíku do chemických struktur asfaltu a jejich přeměně na sloučeniny. Tato chemická změna asfaltového pojiva má zásadní vliv na fyzikální vlastnosti, jako je pružnost, modul tuhosti a nízkoteplotní křehkost. Tyto chemické změny se souhrnně označují jako oxidační stárnutí asfaltového pojiva.

Oxidační stárnutí se nejvíce projevuje při technologických procesech (výroba, doprava, pokládka směsi), kdy je asfaltové pojivo vystaveno vysokým teplotám na velké ploše. Proces oxidačního stárnutí pokračuje i v průběhu celé životnosti asfaltové vrstvy vozovky. Veliký vliv na stárnutí má difuzní odpor asfaltového filmu (zvyšuje se s jeho tloušťkou), propustnost asfaltové vrstvy pro molekuly kyslíku (závislá na mezerovitosti a tloušťce), vliv ultrafialového záření atd. Tyto reakce jsou výrazně pomalejší než výrobní. Teplota významně ovlivňuje

hloubku oxidace (zvyšující se teplota prohlubuje oxidační účinek působení kyslíku). [4]

### **3.3.2. Destilační stárnutí**

Destilační proces (odpařování) probíhá nejvíce při zpracování asfaltových pojiv za horka. Nejvíce se odpařování projevuje u asfaltů, u nichž dochází ve větší míře k štěpení uhlovodíkových molekul nebo které obsahují lehké olejové podíly. Pokud působí zvýšená teplota déle, dochází k odpařování těchto olejů. Zásadní vliv spočívá ve funkčních vlastnostech lehkých olejových podílů, které se významně podílí na viskozitě pojiva. Vydestilování těchto lehkých složek se projeví na snížení penetrace pojiva. Stárnutí odpařováním závisí především na teplotě, velikosti povrchu a penetraci asfaltu. [4]

### **3.3.3. Exudační stárnutí (migrační procesy)**

Obdoba destilačního stárnutí jsou migrační procesy, které však probíhají za normálních teplot a s menší rychlostí. Migrační procesy probíhají nejčastěji v podmínkách, kdy jsou do asfaltového pojiva přimíchány malé podíly fluxačních olejů, nebo pokud nejsou při výrobě použity dostatečně výkonné destilační kolony. Toto má za následek, že asfaltové pojivo ztrácí plasticitu, elasticitu a křehne. [4]

### **3.3.4. Strukturální stárnutí**

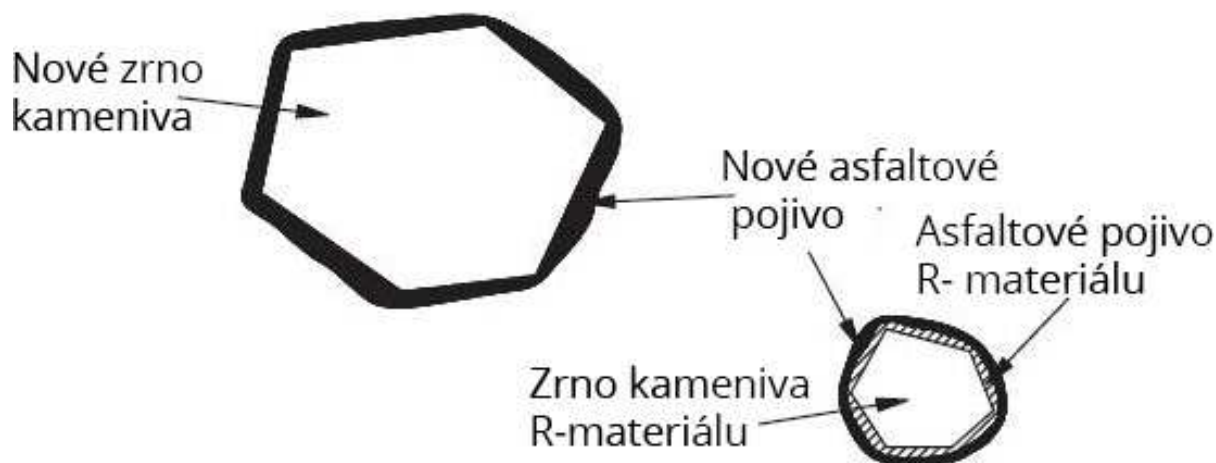
Strukturální stárnutí (tvrdnutí) se nejvíce projevuje, pokud je asfaltové pojivo vystaveno nízkým teplotám po delší časové období. Ve většině případů se jedná o vratný děj, který není spojen s chemickými změnami materiálu. Jde spíše o reorganizaci a zafixování molekul. Ve svém důsledku vedou tyto procesy k zdánlivému zvýšení tvrdosti asfaltu. [4]

### 3.4. Černá skála

Pojem černá skála se objevuje v zahraniční studii na rozpoznání R-materiálu ve směsích [7] a představuje část vrstevnaté struktury pojiva obklopující kamenivo.

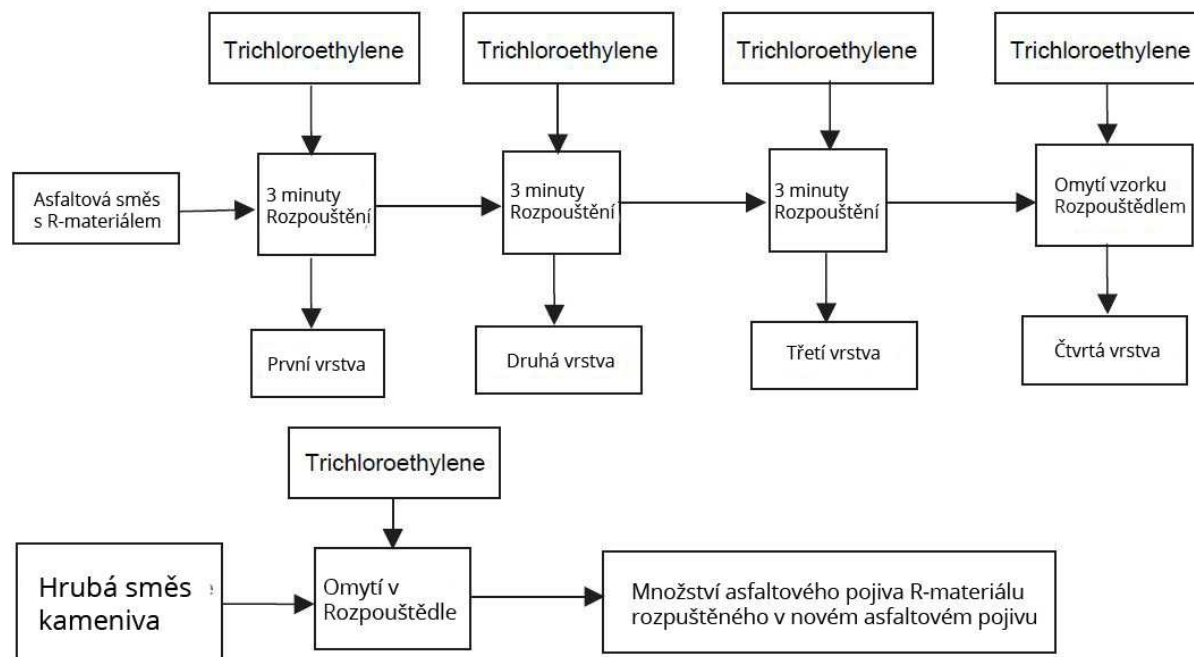
Studie se zabývá asfaltovými směsmi s přítomností R-materiálem. Snaží se zodpovědět, kolik pojiva z R-materiálu se při výrobě smísí s novým pojivem, jak se podílí na mechanických vlastnostech a jakou vrstevnatou strukturu vytváří. Předpokládají vrstevnatý systém, který vznikne smísením nového (měkkého) pojiva s pojivem z R-materiálu (tvrdého), který je umístěn zejména na povrchu zrn kameniva R-materiálu (Obr. 3.5). Dále se snaží zjistit, jak tento vrstevnatý systém ovlivní mechanické vlastnosti asfaltové směsi. [7]

#### ASFALTOVÁ SMĚS S R-MATERIÁLEM

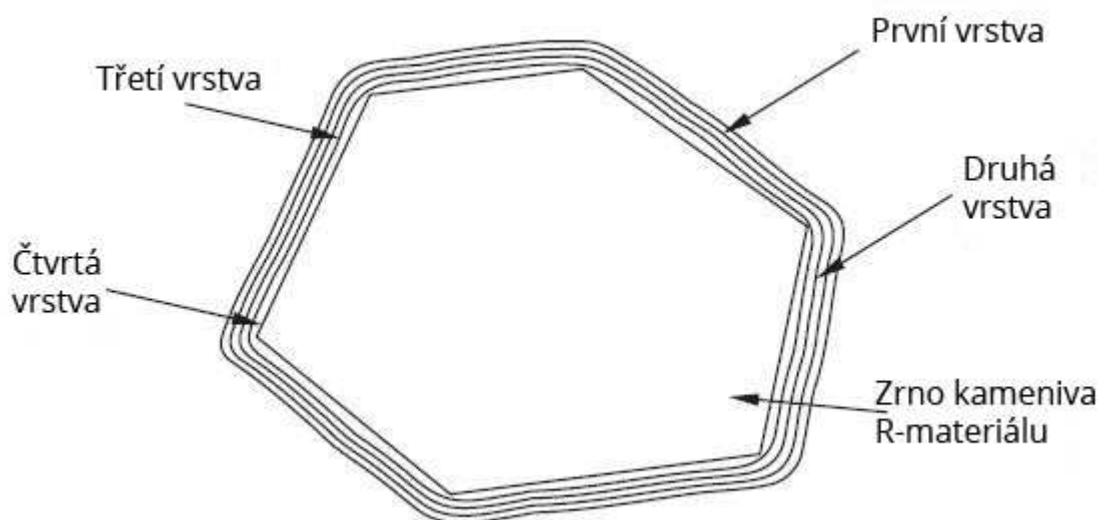


Obr. 3.5 Porovnání vrstev asfaltového pojiva na kamenivu u směsí s obsahem R-materiálu a bez něj [7]

Pro určení vlastností pojiva obsaženého v R-materiálu byla vyvinuta zkouška, tzv. postupná extrakce. Princip spočívá v postupném namáčení asfaltové směsi s R-materiálem v rozpouštědle, např. v roztoku trichlorethylenu (Obr. 3.6). Byl stanoven počet tří extrakcí po 3 minutách a čtvrté poslední úplné omytí vzorku. Takto získané čtyři vzorky byly dále vyčištěny a destilovány. Výsledkem byla čtyři pojiva obsažená ve vrstvičkách, postupně se přibližujících (kamenivu) nosné struktuře. Schéma postupu zkoušky je naznačeno v následujícím obrázku (Obr. 3.7). [7]

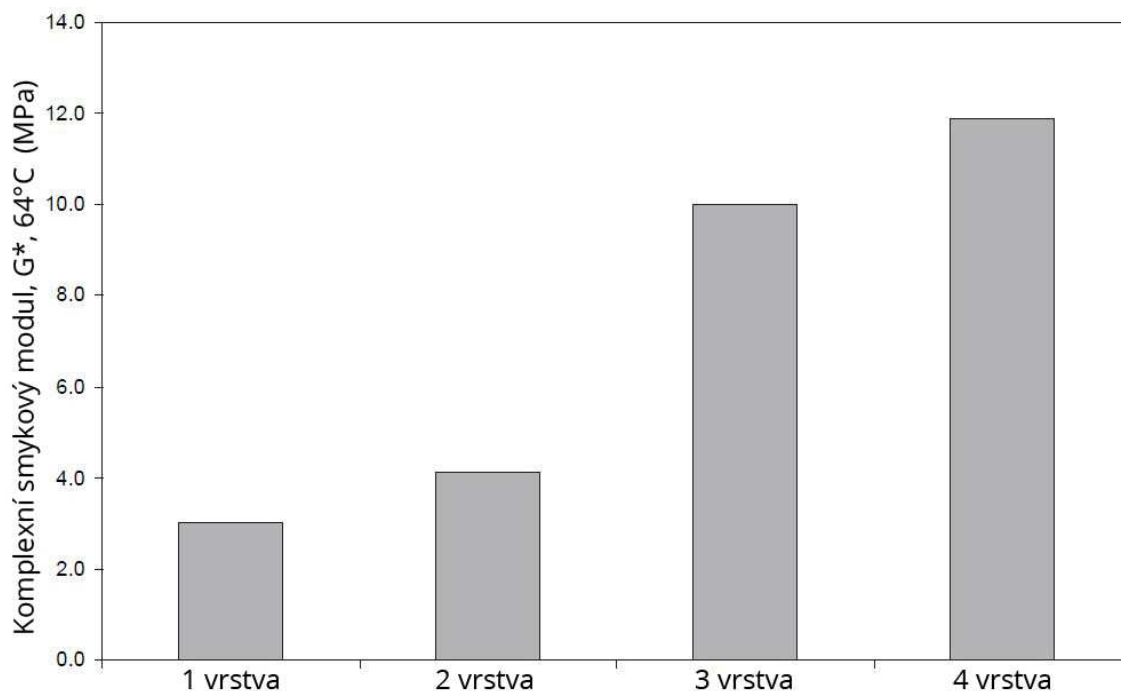


Obr. 3.6 Schéma postupné extrakce [7]



Obr. 3.7 Schéma vrstevnaté struktury zestárlého asfaltového pojiva obklopující kamenivo [7]

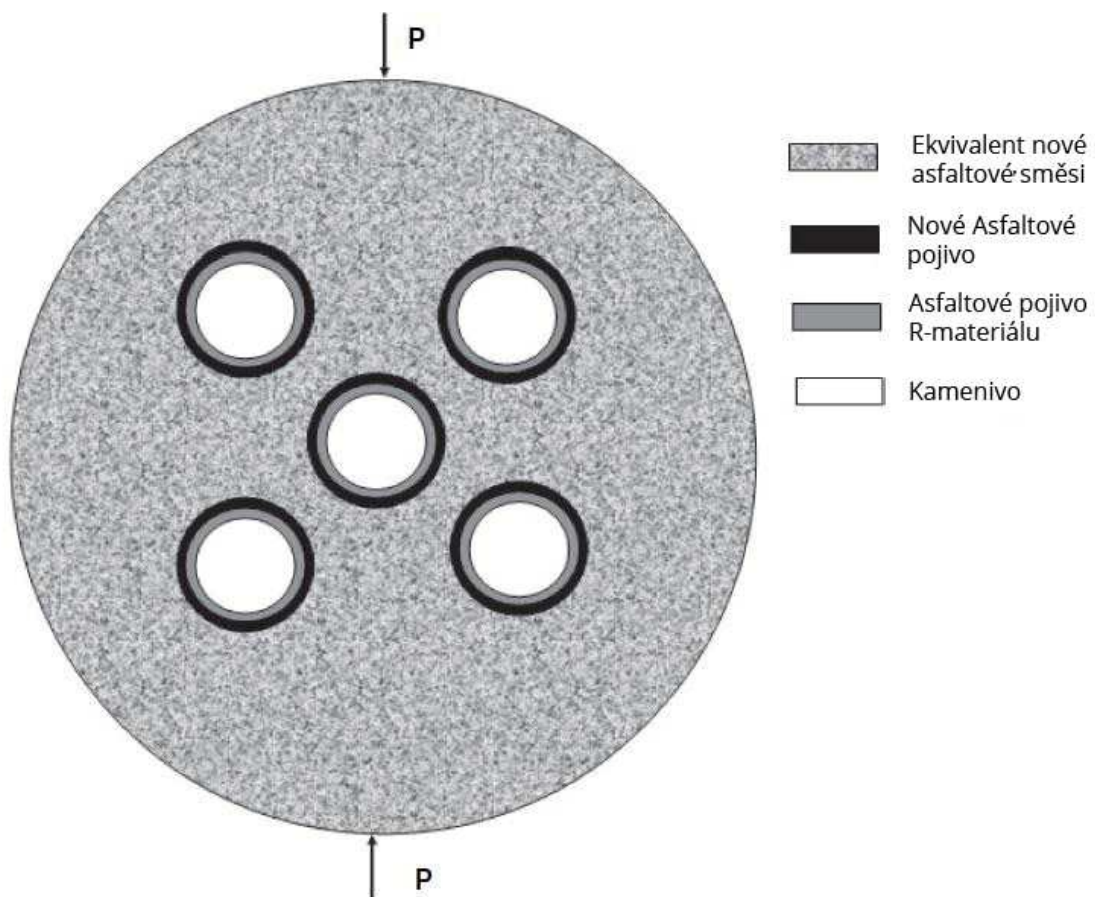
Výsledkem bylo potvrzení předpokladu, že při mísení kameniva, nového asfaltového pojiva a R-materiálu nebude vzniklá směs obsahovat pojivo s homogenními vlastnostmi, ale vznikne vrstevnatý systém pojiva na povrchu kameniva (obr. 3.7). Tloušťky asfaltových vrstev kolem R-materiálu (od první do čtvrté vrstvy) byly 2,0; 1,1; 1,8 a 1,6 mikrometrů. Bylo zjištěno, že viskozita i komplexní smykový modul asfaltu se zvyšovala z vnějších vrstev na vnitřní. Asfalt ve vrstvách 3 a 4 (primárně pocházející z R-materiálu) byl mnohem tužší než převážně nový dávkovaný asfalt ve vrstvách 1 a 2 (graf 3.1).



Graf 3.1 Komplexní smykový modul jednotlivých vrstev vrstevnatého systému obklopující kamenivo [7]

Pokud jde o tloušťku filmu pojiva na povrchu kameniva, přibližně 60 % z celkové tloušťky mělo asfaltové pojivo vlastnosti blízké čistému pojivu získaného z R-materiálu, zatímco vnějších 40 % pojiva dosahovalo vlastností srovnatelných s novým pojivem. Z výpočtu ztráty pojiva při míchání směsi bylo odvozeno, že procentuální množství spolupůsobícího pojiva není ovlivněno procentuálním zastoupením R-materiálu ve směsi. Množství spolupůsobícího pojiva se pohybuje okolo 10–15 %. Toto uvolněné pojivo se smísí s novým a vytváří další vrstvu. Výsledný kompozit asfaltové směsi tedy obsahuje 4 vrstvy. První vrstva nové pojivo, druhá vrstva směs nového pojiva a pojiva z R-materiálu, třetí pojivo R-materiálu (černá skála) a kamenivo (obr. 3.8). [7]





Obr. 3.8 Vrstevnatá struktura asfaltové směsi s R-materiálem [7]

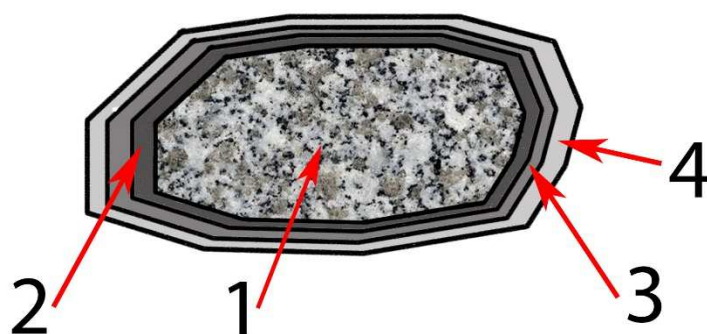
Odvození vlivu přítomnosti vrstevnaté struktury pojiva na zatížení je simulováno pomocí Eshelbyho střední teorie kompozitních materiálů. Teorie rozděluje kompozitní asfaltovou směs na dvě vrstvy. První: nové pojivo a vrstvu promíseného nového pojiva s uvolněným pojivem R-materiálu. Druhou: velmi tvrdé oxidované pojivo obklopující kamenivo a kamenivo „černá skála“.

Pomocí softwaru COSMOS/M byla vytvořena analýza modelu na vliv smykového napětí. Výsledkem bylo zjištění, že zatížení se rovnoměrně přenáší mezi referenčními strukturami a síly se rozkládají rovnoměrněji. To zamezuje náhlé změně tuhosti. [7]

### 3.5. Vrstevnatost pojiva ve směsích obsahujících R-materiál

V této kapitole se budu zabývat rozvedením myšlenky předešlé studie černé skály (viz kapitola 3.4) Tato studie se zabývala dokázáním a popsáním vrstevnaté struktury pojiva u asfaltové směsi s přítomností R-materiálu. Tuto strukturu našla a dokázala zkušebními metodami. Já tuto myšlenku aplikuji na stejný problém, ale jinou otázku. Jde prokázat přítomnost R-materiálu v asfaltové směsi za předpokladu vrstevnaté struktury nového asfaltového pojiva s pojivem R-materiálu a jejich rozdílných reologických vlastností.

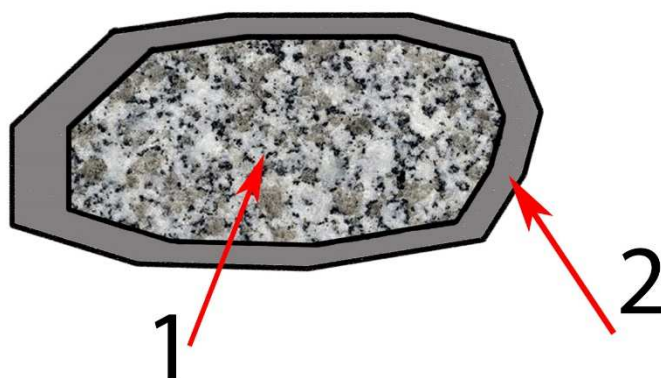
Popsání a pochopení vrstevnaté struktury pojiva ve směsi s R-materiálem a pojiva ve směsi bez R-materiálu je zásadním aspektem diplomové práce. Veškerá zásadní tvrzení se opírají právě o tuto myšlenku. Pro ilustraci pochopení simuluji dva případy aplikace pojiva na kamenivo při výrobě asfaltových směsí. Na obrázku 3.9 je zobrazeno kamenivo R-materiálu. Na obrázku 3.10 je zobrazeno nové kamenivo.



- 1 – Kamenivo
- 2 – Černá skála
- 3 – Promísená pojiva
- 4 – Pojivo nové

Obr. 3.9 Vrstevnatá struktura směsi s přidaným R-materiálem

Z obrázku je patrná struktura pojiva obklopující zrno kameniva R-materiálu. Pojivo obklopující kamenivo sestává ze tří složek. První označená jako 2 je tzv. černá skála. Druhá označená číslem 3 je směs pojiva uvolněného z R-materiálu s pojivem novým. Třetí vrstva je složena z pojiva nového. Výsledky zkoušek naznačují, že vrstva 3 a 4 zastává pouze jednu vrstvu vzájemně promísených pojiv.



1 – Kamenivo

2 – Pojivo

Obr. 3.10 Vrstevnatá struktura směsi bez R-materiálu

Můžeme tvrdit, že při námi známých procesech výroby:

- Dávkování R-materiálu přímo do míchačky šaržové obalovny
- Dávkování R-materiálu předehřátého v paralelním bubnu šaržové obalovny
- Dávkování R-materiálu v kontinuální obalovně metodou Drum-mix

[7]

Nejsme schopni rozehrát veškeré pojivo R-materiálu tak, aby se všechno smísilo s novým pojivem. Aby k tomuto došlo, musel by být R-materiál zahřát na velmi vysokou teplotu po velmi dlouhou dobu a mísení by muselo také trvat relativně dlouhou dobu. K provádění takového mísení není relevantní důvod. Způsobilo by velkou degradaci směsi vlivem vysokých teplot, výrazně by se navýšily výrobní náklady a zničili bychom účinnou vrstevnatou strukturu.

Pokud žádná z výrobních metod není schopna zcela zajistit promísení veškerého pojiva R-materiálu s pojivem novým, můžeme tvrdit, že ve směsích s R-materiálem bude vždy přítomné kamenivo R-materiálu, které je obaleno pojivem s vrstevnatou strukturou (Obr. 6.9).

Další zásadní myšlenkou je tloušťka vrstev pojiva obklopující zrno kameniva. Lze předpokládat rovnoměrné rozložení množství pojiva obklopující kameniva. Zde ale narážíme na rozpor. Pokud nejsme schopni rozpustit veškeré pojivo R-materiálu a zároveň předpokládáme rovnoměrné rozložení tekutého pojiva (směs části rozpuštěného pojiva R-materiálu a pojivo nové), je pravděpodobné, že vrstva pojiva okolo R-materiálu je větší, tloušťka filmu okolo kameniva R-materiálu je navýšena právě o vrstvu nazvanou jako černá skála.

### 3.6. Rejuvenátor

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, během celého životního cyklu dochází u asfaltového pojiva k zásadním fyzikálním i chemickým změnám. Asfaltové pojivo vlivem stárnutí tvrdne. Je tužší, ale méně plastické. Abychom R-materiál s tímto zestárlým pojivem mohli využít do nové konstrukční vrstvy, je nutné pojivo upravit podle požadavků stanovených státní normou. Obecně je snaha zlepšit fyzikálně-chemické vlastnosti, především dynamickou viskozitu pojiva. Pro tento účel byly vyvinuty „oživovače“ asfaltu – rejuvenátory. [8] [9] [25]

Rejuvenátory často obsahují výtažky z mazacích olejů, které obsahují vysoký podíl maltenických složek (naftenů a polárních aromatických sloučenin), pomáhající obnovit složení zestárlého pojiva, které ztratilo své malteny během životního cyklu ve vozovce. Rejuvenátory mají vysoký podíl aromatů, které jsou nezbytné k zachování rozptýlených asfaltenů. Na druhé straně obsahují i nízký podíl saturátů, které jsou vysoce neslučitelné s asfaltem. [10] [11] [25]

Efektivnost rejuvenátorů závisí na jednotném rozptýlení rejuvenátorů v asfaltové směsi a absorpce rejuvenátoru do zestárlého asfaltového pojiva obalující kamenivo. [8][9] [25]

V současné době existuje mnoho typů rejuvenátorů k obnově vlastností zestárlého asfaltového pojiva v R-materiálu. Dají se rozdělit do několika kategorií, podle původu se rozlišují parafinické oleje, naftenové oleje, riacylglyceroly a mastné kyseliny, aromatické extrakty a tálové oleje. [10]

### 3.7. Zjišťování přítomnosti R-materiálu v asfaltové směsi

Tato část diplomové práce vychází z rozsáhlé studie [11], která se zabývá vyvinutím zkušebních metod pro odhalování R-materiálu v asfaltových směsích.

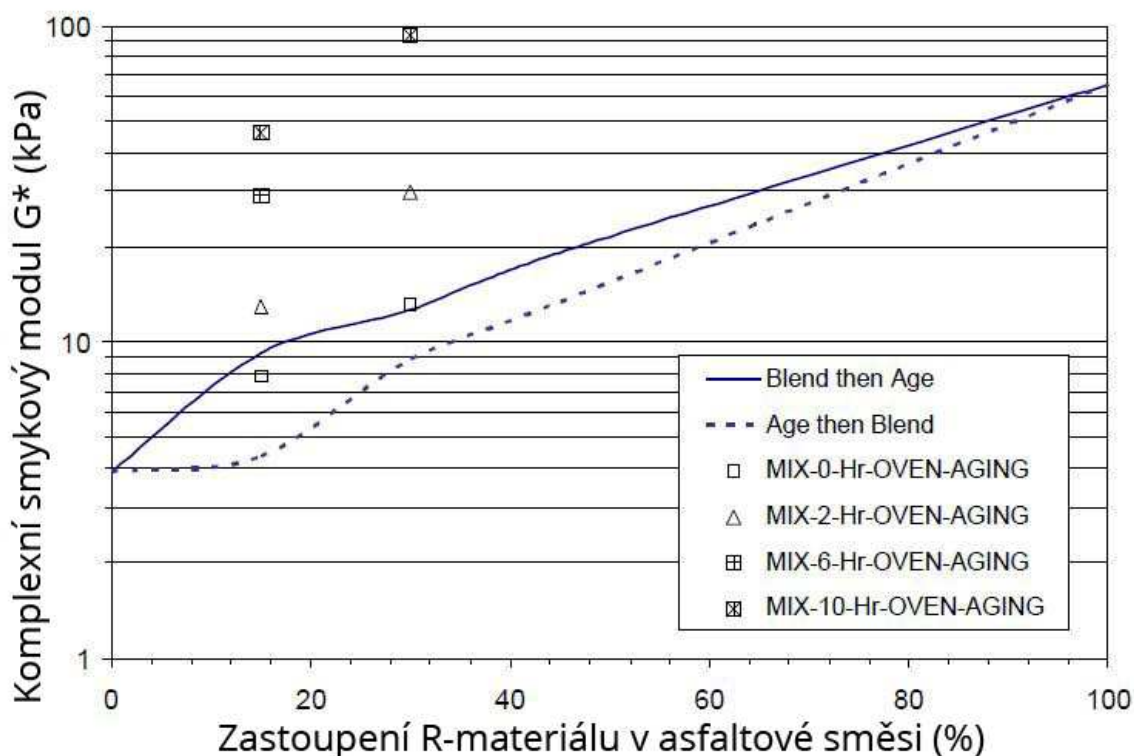
V rešeršní části zmíněné studie se analyzuje 1600 vědeckých článků zabývajících se R-materiálem. Zkoumá se vliv R-materiálu na směsi, jejich použití, kontrolovanou evidenci a rozsah použití směsí. V praktické části studie se vyvíjí metodu vhodnou pro simulaci výroby směsi v obalovnách. Testuje se několik metod určených pro diagnostiku přítomnosti R-materiálu v asfaltových směsích. V první části vyvíjí metodu simulující výrobní proces asfaltové směsi, který výrazně mění vlastnosti. V následující se zaměří na vyvinutí zkušebních metod založené na různých předpokladech. [11]

- A. Optické metody: rozpoznávající přítomnost R-materiálu vizuálně
- B. Chemické metody: předpokládají rozdílnou oxidaci nového pojiva a pojiva z R-materiálu
- C. Fyzikální metody: předpokládá rozdílné reologické vlastnosti směsi s přítomností R-materiálu.

#### 3.7.1. Metodika simulace změn vlivem výroby

Na základě doporučení (Superpave, SP-2), byla vyvinuta metoda simulující změny zkoušených směsí vlivem výroby. V laboratorních podmínkách je směs vyráběna šetrněji, a proto není objektivně vhodná pro simulace metod, odhalujících přítomnost R-materiálu ve směsích.

Metoda vycházela ze známých vlastností extrahovaného pojiva z vyrobené směsi na obalovně, zjištěných dynamickým smykovým reometrem (DSR). Na základě těchto dat hledali ideální simulaci. Vycházeli z metody, která laboratorně vyrobenou směs, ovlivňovala po určitou dobu stálým proudícím horkým vzduchem v laboratorní sušárně. Teplota byla stanovena na 165 °C. Doba nutná pro ideální průběh simulace byla zkušebním postupem stanovena na 2 h. Simulace se prováděla v časech 0 h, 2 h, 4 h, 6 h. Výsledky jsou zobrazeny v následujícím grafu (graf 3.2). [11]



graf 3.2 Graf kalibrace metody simulace vlivu teploty výroby na asfaltovou směs [11]

### 3.7.2. Metoda částečné extrakce

Metoda vychází z teoretického předpokladu fungování směsi s obsahem R-materiálu, popsaného v kapitole Černá skála (kap. 3.4). Při tomto předpokladu strukturního členění asfaltového pojiva a předpokladu rozdílné rozpustnosti tvrdých (staré pojivo) a měkkých (nové pojivo) složek lze předpokládat rozdílnou rychlost rozpouštění pojiva obsaženého v asfaltové směsi v závislosti na čase. Metoda s relativně přesně danou metodikou pro úplné rozpuštění asfaltové směsi bez R-materiálu nebude schopna ve stejně daném časovém rámci rozpustit všechno pojivo fixované v okolí kameniva R-materiálu. Na jeho povrchu tak zůstane opticky rozpoznatelný zbytek nejtvrďší složky pojiva ve směsi (tzv. černá skála). [11]

Tato metoda byla v USA rozsáhle zkoumána s použitím různých rozpouštědel a s různou dobou rozpouštění. Metoda se při vhodně zvolených okrajových podmínkách ukázala jako velmi vhodná pro určení přítomnosti R-materiálu ve směsi. [11]



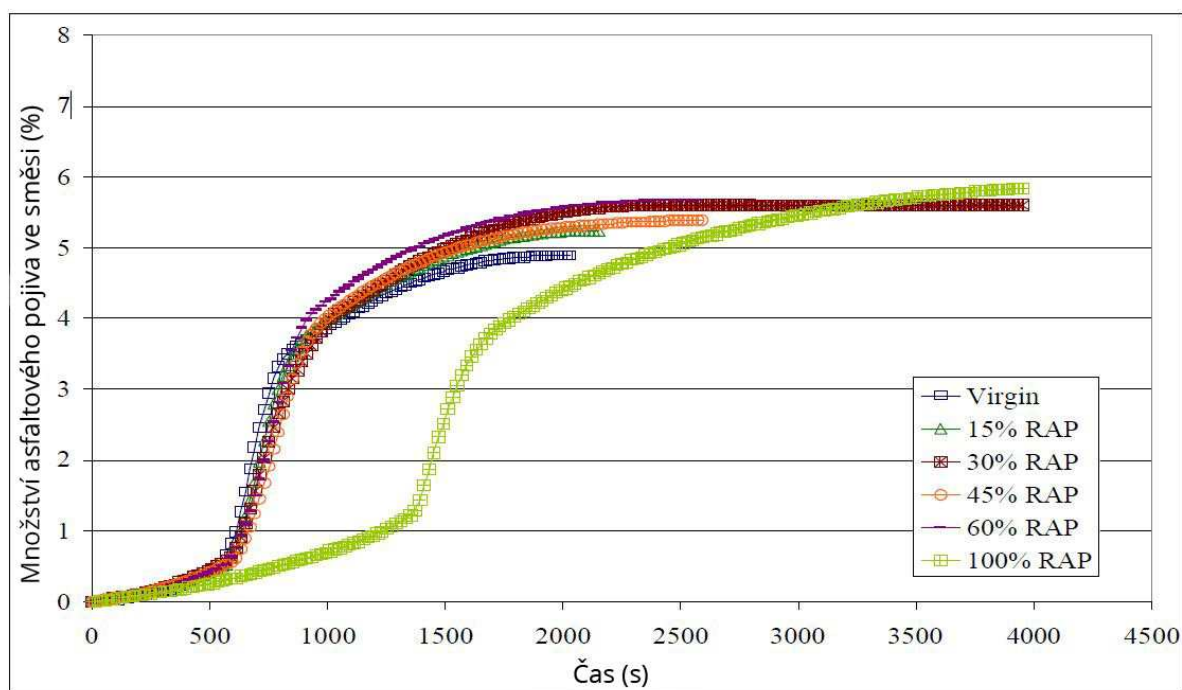
### 3.7.3. Metoda pálení v peci

Tato metoda pohlíží na problematiku zjišťování přítomnosti R-materiálu z pohledu chemického, a to oxidačního. Předpokládá, že asfaltové pojivo bude rozdílně oxidovat vzhledem k jeho chemickým vlastnostem. Rozpoznání přítomnosti R-materiálu vychází z rozdílného průběhu křivky, zaznamenávající ubývající hmotnost při oxidaci asfaltové směsi (hoření). [11]

Pokud směs neobsahuje R-materiál, křivka úbytku hmoty při oxidaci bude plynulá. Pojivo má stejné vlastnosti a bude plynule hořet.

Pokud směs R-materiál obsahuje, začátek úbytku bude podobný, ovšem ve chvíli, kdy všechno nové pojivo oxiduje, nastane chvilkový pokles plynulosti úbytku hmoty, než začne oxidovat pojivo R-materiálu. Tímto způsobem by šlo určit i množství přítomnosti R-materiálu. [13]

Metoda vyžaduje jinou kalibraci pro každý typ směsi. Z tohoto důvodu se od určování přítomnosti a množství R-materiálu metodou pálení v peci upustilo. Z přiloženého grafu, který naznačuje procentuální úbytek pojiva ze směsi v čase, lze vidět korelace s množstvím R-materiálu (graf 3.3). [13]



Graf 3.3 Úbytek hmoty metodou pálení v peci asfaltových pojiv o různém procentuálním zastoupení R-materiálu [13]

### 3.7.4. Metoda reologické analýzy pojiva

Reologická analýza je obecně považována za aktuálně nejpřesnější konvenčně používanou metodu diagnostiky asfaltových pojiv. V této studii se přihlíželo na dvě důležité reologické veličiny. Komplexní smykový modul určující vztah mezi plastickou a elastickou složkou pojiva a dynamickou viskozitu (viz kapitola 3.2). [13]

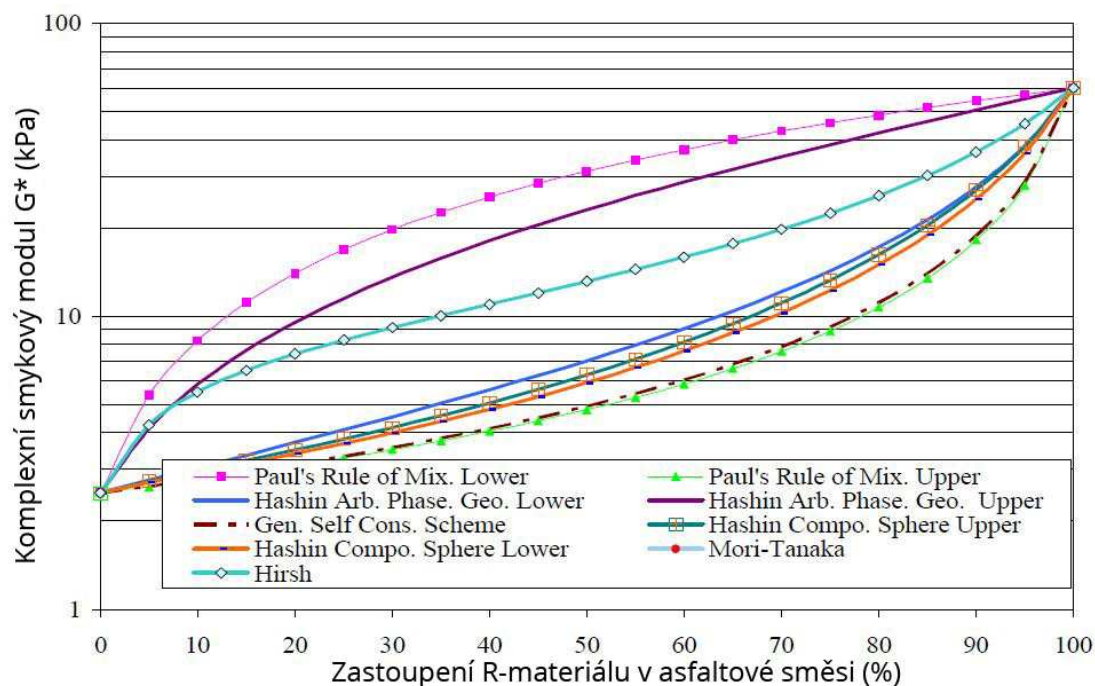
Metoda reologické analýzy pojiva je založena na principu černé skály (viz kapitola 3.4). Tento princip předpokládá významně měnící se reologické vlastnosti pojiva s přibývajícím obsahem R-materiálu. [13]

Autoři studie zaujímají k této metodě zvláštní stanovisko. Snaží se vytvořit referenční křivku pojiva, která by určovala komplexní smykový modul, ve vztahu k množství R-materiálu. Toto stanovisko respektovalo několik fází vývoje této metody:

- A. Diagnostiku podobných studií a srovnání různých křivek pojiv s přibývajícím obsahem R-materiálu
- B. Vyhodnocení a aplikace na vlastní výsledky.
- C. Vytvoření referenční křivky změny komplexního smykového modulu ve vztahu k R-materiálu.

Ihned v úvodu autoři shromáždili velké množství podobných studií zabývajících se vlivem přítomnosti R-materiálu na komplexní smykový modul. Všechny dostupné výsledky pak vložili do následujícího srovnávacího grafu (graf 3.4). [11]





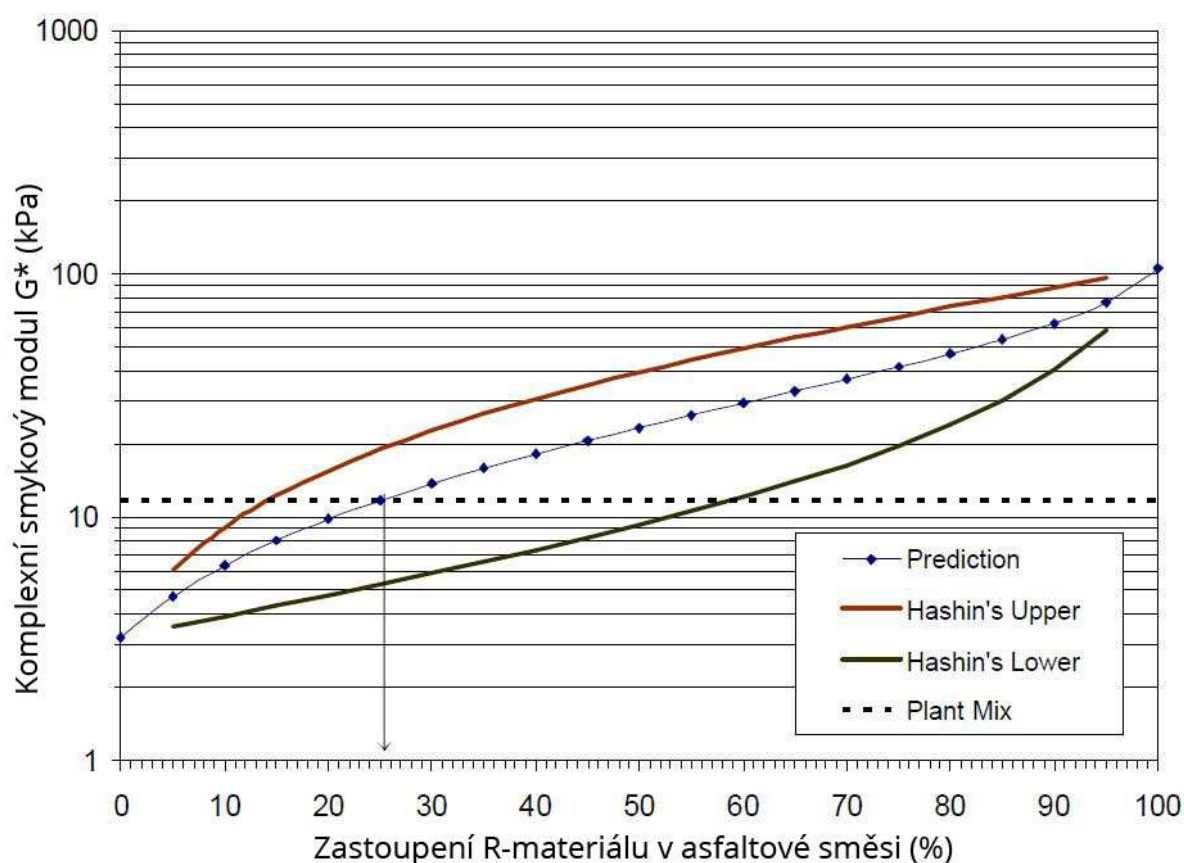
Graf 3.4 Referenční křivky asfaltových pojiv o různém množství R-materiálu. [11]

Do těchto dat vložili svá naměřená data se změnami komplexního smykového modulu v poměru k přítomnosti R-materiálu (graf 3.5). [11]



Graf 3.5 Vložení vlastních dat studie do referenčních křivek [11]

Z těchto dat odvodili nejvíce vhodné parametry pro referenční křivku pojiva a vytvořili graf pro určování přítomnosti R-materiálu (graf 3.6). [11]



Graf 3.6 Referenční křivka pro určení přítomnosti R-materiálu [11]

Velkou nevýhodou této metody je pracnost vytvoření referenční křivky, která se bude výrazně lišit u různých pojiv a způsobů výroby asfaltové směsi. [11]

Tato studie se také zabývala dynamickou viskozitou, ale viskozita nemá lineární průběh ve vztahu k navyšování podílu R-materiálu. Dále je dynamická viskozita jednoduše ovlivnitelná přísadami. Z těchto důvodů se pro diagnostiku přítomnosti R-materiálu ve směsích o využití dynamické viskozity upustilo. [11]

### 3.8. Shrnutí

Úvodní část objasňuje viskoelastické chování asfaltů a následné změny jeho vlastností vlivem stárnutí. Z uvedených poznatků lze vyvodit, že při stárnutí se z asfaltového pojiva vytrácejí měkké lehké složky. Asfalt do své mikrostruktury přijímá kyslík a stává se více elastickým, ale zároveň méně plastickým. Tento jev, ztráty lehkých složek, lze dočasně kompenzovat vložením rejuvenátorů do struktury pojiva, čímž se asfalt změkčí.

Tohoto jevu si povšimli ve studii [7] a vytvořili koncept tzv. černé skály, který popisuje vliv a chování pojiva v R-materiálu na směsi tvořené tímto R-materiálem. Dále rozebírá množství aktivně spolupůsobícího množství pojiva R-materiálu, který uvádí okolo 11 %. To je v rozporu s obecným trendem výroby brát 100 % spolupůsobící efektivitu pojiva v R-materiálu v nově vytvořené asfaltové směsi.

Dále jsme si uvedli některé z metod diagnostiky R-materiálu ve směsích, které jsme v souvislosti s našimi možnostmi schopni využít v této diplomové práci. Jako velmi vhodné metody pro další rozpracování se ukazují metoda částečné extrakce a metoda reologické analýzy. [11]

## 4 POUŽITÉ KONVENČNÍ ZKUŠEBNÍ METODY

V následující části diplomové práce budou vysvětleny principy, průběhy a výpočty laboratorních zkoušek asfaltových směsí a asfaltových pojiv, které byly v praktické části ověřovány.

### 4.1. Stanovení zrnitosti podle ČSN EN 933-1

#### 4.1.1. Podstata metody

Zkouška zrnitosti spočívá v roztrídění a oddělení materiálu (kameniva) prostřednictvím sady sít do několika frakcí. Síta jsou seřazena sestupně dle velikosti otvorů na sítích 0,063–0,125–0,250–0,50–1,0–2,0–4,0–8,0–11,2–16,0–22,4–31,5 mm. [12]

#### 4.1.2. Postup zkoušky

Zůstatek na sítích po znovuzískávání pojiva (viz kapitola 4.7), se vysuší v sušárně při teplotě  $110 \pm 5$  °C do ustálené hmotnosti, nechá se vychládnout, zváží se a stanoví se hmotnost  $M_2$ . Takto vysušený vzorek nasypeme na sadu sít do prosévacího stroje. Horní síto se přiklopí víkem, aby nedošlo ke ztrátě materiálu. Následuje 10 minut otřásání ve vibračním zařízení, poté se zůstatek na každém síti protřepe ještě manuálně a následně se zváží. Tento postup se opakuje pro všechna síta a hmotnosti zůstatků na jednotlivých sítích se zaznamenávají a stanoví se křivka zrnitosti. [12]

#### 4.1.3. Výpočet

Vypočítá se hmotnost zůstatků na každém síti jako procento hmotnosti původní vysušené navážky  $M_1$ . Vypočítají se také součtová procenta hmotnosti původní navážky, která sestupně propadla sítí, kromě síta 0,063 mm. Stanoví se procento jemných částic ( $f$ ), které propadly sítem 0,063, podle následujícího vztahu (3). K tomuto číslu následně přičteme jemné částice zachycené při extrakci pojiva v extraktoru (viz kapitola 4.7). [12]

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} * 100$$

*Vzorec pro výpočet procentuálního množství jemných částic (3)*

kde:  $M_1$  hmotnost vysušené zkušební navážky [kg]  
 $M_2$  hmotnost vysušeného zůstatku na síti 0,063 mm [kg]  
 $P$  hmotnost propadu jemných částic na dně [kg].

## 4.2. Stanovení obsahu pojiva ve směsi ČSN 73 6160

Stanovení obsahu pojiva ve směsi vychází z matematického vztahu (4), kde známe hmotnost vzorku asfaltové směsi, který byl podroben znovuzískání pojiva (viz. kapitola 4.8). Od této hmotnosti odečteme celkovou hmotnost kameniva po této proceduře, ke které je přičtena hmotnost jemných částic zachycená v extraktoru (celková hmotnost kameniva bez pojiva). [16]

$$P = \frac{(M_1 - M_2)}{M_1} * 100$$

*Vzorec na výpočet procentuálního obsahu pojiva v asfaltové směsi (4) [16]*

kde:  $M_1$  hmotnost vzorku asfaltové směsi [kg]  
 $M_2$  hmotnost kameniva po extrakci pojiva [kg]

## 4.3. Výroba Marshallových těles podle ČSN EN 12697-30

Marshallova tělesa jsou nutná pro stanovení objemové hmotnosti hutněné asfaltové směsi. Vyrábí se v rázovém zhutňovači podle normy ČSN EN 12697-30 [26]

Navážená asfaltová směs se vytáhne ze sušárny a nasype se do vyhřáté formy určené pro Marshallovo těleso. Při požadované teplotě (v tomto případě 150 °C) se hutní v rázovém zhutňovači z obou stran padesáti údery. Po zhutnění se nechá vychladnout na podložce a poté se vytlačí z formy. Z každé směsi je nutné vyrobit tři vzorky, které jsou podrobeny zkouškám. Z výsledků se pak vytvoří aritmetický průměr zkoušených směsí. [13]

## 4.4. Stanovení objemové hmotnosti z asfaltových zkušebních těles podle ČSN EN 12697-6+A1

Zkouška stanovení objemové hmotnosti podle ČSN EN 12697-6+A1 [13] se provádí na všech třech Marshallových tělesech (viz kapitola 4.3) a poté jsou tyto výsledky průměrovány. Pokud se nějaké těleso výrazně liší svojí objemovou hmotností, vyřadí se a průměr se stanoví ze zbylých dvou těles. Objemová hmotnost se stanoví z hmotností zkušebního tělesa zváženého na suchu, ponořeného ve vodě a osušeného na povrchu. [13]

### 4.4.1. Postup zkoušky

Zkušební vychladlé Marshallovo těleso se zváží a stanoví se hmotnost  $m_1$ . Zkušební těleso se ponoří do vodní lázně vytemperované na známou teplotu. Teplotu vodní lázně je nutné si zaznamenat. Těleso se nechá dostatečně dlouho sytit vodou tak, aby se jeho hmotnost po nasycení ustálila na konstantní teplotu. Minimální doba pro nasycení je 30 minut. Poté se stanoví hmotnost ponořeného tělesa  $m_2$ . Je nutné, aby na povrchu tělesa neulpívaly žádné vzduchové bubliny nebo z něj nevycházely při vážení. Těleso se následně vyjme z vodní lázně, povrchově se osuší a stanoví se hmotnost  $m_3$ . [13]

### 4.4.2. Výpočet

Objemová hmotnost zhutněného asfaltového tělesa se vypočte podle následujícího vztahu (5). [13]

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_2 - m_3} * \rho_w$$

Objemová hmotnost (5) [13]

kde:  $\rho_{bssd}$  objemová hmotnost zhutněné asfaltové směsi [kg/m<sup>3</sup>]  
 $m_1$  hmotnost suchého zkušebního tělesa [g]  
 $m_2$  hmotnost zkušebního tělesa ve vodní lázni [g]  
 $m_3$  hmotnost zkušebního tělesa nasyceného vodou a povrchově osušeného [g]  
 $\rho_w$  hustota vody při zkušební teplotě [kg/m<sup>3</sup>] [13]

## 4.5. Stanovení maximální objemové hmotnosti podle ČSN EN 12697-5+A1

Maximální objemová hmotnost podle ČSN EN 12697-5+A1 [14] se společně s objemovou hmotností používá k výpočtu obsahu mezer ve zhutněném tělese (mezerovitost) a dalších vlastností zhutněné asfaltové směsi, které se vztahují k jejímu objemu.

U volumetrického postupu se maximální objemová hmotnost asfaltových směsí stanoví z objemu vzorku bez mezer a jeho suché hmotnosti. [14]

### 4.5.1. Postup zkoušky

Zkoušená asfaltová směs se musí rozdrobit a rozdělit na hrubé částice a shluky. Největší rozměr shluku nesmí být větší než 6 mm.

Pyknometr o známé hmotnosti  $m_1$  a objemu  $V_1$  se naplní vysušeným zkušebním vzorkem a stanoví se hmotnost naplněného pyknometru i s nástavcem  $m_2$ . Pyknometr se naplní odvzdušněnou vodou maximálně do výšky 30 mm pod okraj. Zachycený vzduch se odstraní použitím částečného vakua, kam se pyknometr vloží na dobu  $15 \pm 1$  minut. Tlak ve vakuu musí být 4 kPa nebo menší.

Nástavec pyknometru se nasadí po opatrném naplnění pyknometru odvzdušněnou vodou po referenční značku nástavce, aby nedošlo k vniknutí vzduchu. Pyknometr se umístí do vytemperované vodní lázně. Teplota lázně musí být  $25 \pm 1$  °C. Pyknometr se nechá ve vodní lázni nejméně 30 minut, maximálně však 180 minut.

Následně se pyknometr doplní po značku na nástavci vodou, která má stejnou teplotu jako vodní lázeň, a vytáhne se z vodní lázně. Osuší se z vnější strany a ihned se stanoví jeho hmotnost  $m_3$ . [14]

### 4.5.2. Výpočet

Maximální objemová hmotnost asfaltové směsi se stanoví dle následujícího vzorce (6). [14]

$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{1000 * (V_p - \frac{m_3 - m_2}{\rho_w})}$$

Maximální objemová hmotnost (6) [14]

kde:  $\rho_{mv}$  maximální objemová hmotnost zhutněné asfaltové směsi [kg/m<sup>3</sup>]  
 $m_1$  hmotnost pyknometru s nástavcem [g]  
 $m_2$  hmotnost pyknometru s nástavcem a zkušební vzorku [g]  
 $m_3$  hmotnost pyknometru s nástavcem, zkušební vzorku a vody [g]  
 $V_p$  objem pyknometru při naplnění po referenční značce nástavce [m<sup>3</sup>]  
 $\rho_w$  hustota vody při zkušební teplotě [kg/m<sup>3</sup>] [14]

## 4.6. Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí podle ČSN EN 12697-8

Mezerovitost ve zhutněné asfaltové směsi podle ČSN EN 12697-8 [15] se vypočítá na základě známé objemové hmotnosti zhutněné směsi (viz kapitola 4.4) a maximální objemové hmotnosti asfaltové směsi (viz kapitola 4.5). [15]

### 4.6.1. Výpočet

Mezerovitost asfaltové směsi se vypočte podle následujícího vztahu (7)

$$V_m = \frac{\rho_{mv} - \rho_{bssd}}{\rho_{mv}} * 100$$

Mezerovitost (7) [15]

kde:  $V_m$  mezerovitost asfaltové směsi [%]  
 $\rho_{bssd}$  objemová hmotnost zhutněné asfaltové směsi [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\rho_{mv}$  maximální objemová hmotnost asfaltové směsi [kg/m<sup>3</sup>] [29]



## 4.7. Extrakce asfaltového pojiva z asfaltové směsi podle ČSN EN 12697-1

Extrakci asfaltového pojiva provádíme z několika důvodů. Je nutná pro stanovení zrnitosti směsi, obsahu pojiva a následně veškeré zkoušky pojiva, které musí být zbaveno veškerých složek vyjma samotného asfaltového pojiva. Extrakce se provádí v extraktoru. Přístroj fungující na principu odstředivé síly a filtraci přes filtrační papír (obr 4.1) [24]

### 4.7.1. Postup extrakce

Před samotnou extrakcí je nutno připravit zkušební vzorek a přístroj, ve kterém budeme extrakci provádět.

Asfaltovou směs je nejprve potřeba rozehrát a homogenizovat. Homogenizací rozumíme dostatečné promíchání zajišťující rovnoměrné zastoupení všech frakcí kameniva ve směsi. Homogenizace má za účel eliminovat případnou segregaci směsi.

Příprava extraktoru má zásadní vliv na kvalitu vzorku pojiva, který získáme. Před samotnou extrakcí je potřeba ověřit čistotu přístroje, aby nedošlo k promísení pojiva s pojivem při předchozí extrakci. Dále je potřeba připravit filtrační patronu. Příprava spočívá v umístění filtračního papíru do patrony extraktoru a umístění do přístroje. (obr. 4.1) [24]



Obr. 4.1 Vložení patrony s filtračním papírem do Extraktoru

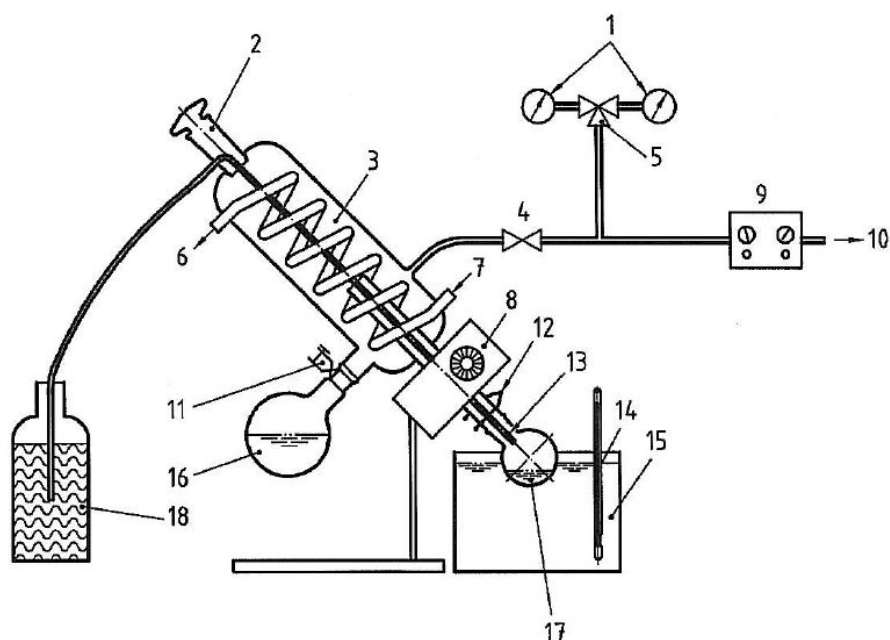
Nyní následuje extrakce. Ta spočívá v opakujícím se promývání směsi tetrachloretylenem a sestupným proséváním na sítích až do úplného uvolnění veškerého pojiva ze směsi, přičemž roztok pojiva a rozpouštědla se zachytává (Obr. 4.2). Takto získáme extrahovaný vzorek pojiva z referenčního vzorku asfaltové směsi rozpuštěný v rozpouštědle. Tento vzorek se musí zbavit rozpouštědla, což se provádí zpětnou destilací (viz blíže kapitola 4.8). Kamenivo zachycené jak na sítích, tak v patroně extraktoru se může vysušit a použít pro zkoušky stanovení zrnitosti (viz kapitola 4.1) a obsahu pojiva (viz kapitola 4.2). [24]



*Obr. 4.2 Síta připravena pro extrakci asfaltového pojiva extraktorem*

## **4.8. Zpětná destilace asfaltového pojiva podle ČSN EN 12697-3**

Pro všechny zkoušky asfaltových pojiv, která jsou znovuzískávána z referenční asfaltové směsi, je nutné provedení zpětné destilace rozpuštěného asfaltového pojiva v rozpouštědle po provedené extrakci (viz kapitola 4.7). Destilace se provádí normovaným postupem v destilační koloně označované jako rotační vakuové destilační zařízení (*obr 4.2*) za normovaných teplot a časů. [17]



#### Legenda

- |                                    |   |
|------------------------------------|---|
| 1 manometr                         | 10 přívod k vakuové vývěvě                                  |
| 2 nasávací kohout                  | 11 šroubovací svorka  |
| 3 chladič                          | 12 pružinová svorka   |
| 4 pomocný přívod vzduchu           | 13 výtoková trubice (konec přibližně v horní třetině baňky) |
| 5 přepínací ventil                 | 14 teploměr   |
| 6 vývod vody                       | 15 olejová lázeň  |
| 7 přívod vody                      | 16 jímací baňka   |
| 8 motor s řízením rychlosti otáček | 17 rotující destilační baňka                                |
| 9 regulátor sníženého tlaku        | 18 asfaltový roztok   |

Obr. 4.3 Popis rotačního vakuového destilačního zařízení [17]

### 4.8.1. Postup destilace asfaltového pojiva

Na destilačním přístroji (obr. 4.4) se nastaví teplota olejové lázně na  $110 \pm 5$  °C a tlak na  $40 \pm 5$  kPa. Chladičem se nechá protékat studená voda. Destilační baňka se vloží do olejové lázně a nechá se rotovat rychlostí 75 otáček/minutu. Pokaždé před nasáváním vzorku doporučujeme zvýšit tlak v destilační koloně, protože tak eliminujeme vznik přetlaku, který může vzniknout a způsobit znečištění destilační kolony. Znečištění nemá negativní vliv na vzorek, ale zbytečně zašpiní znovuzískané rozpouštědlo. Následuje nasátí vzorku otevřením nasávacího kohoutu. Asfaltový roztok nasáváme do destilační baňky přibližně 1 cm pod hladinu olejové lázně. Tetrachloretylen v průběhu extrakce kondenzuje a stéká do jímací baňky. [17]

Po nasátí veškerého asfaltového roztoku se teplota olejové lázně zvýší na  $160 \pm 5$  °C a vzorek se nechá 10 minut destilovat. Následuje pozvolné snižování tlaku na 10 kPa za 1 min až na  $2 \pm 0,5$  kPa. Pokračuje se v destilaci, dokud neskončí odpařování tetrachloretylenu a na asfaltu se nepřestanou dělat bubliny. Pokud se

stále tvoří bubliny a tetrachloretylen se zcela neodpaří, zvýší se teplota na  $185 \pm 5$  °C při stejném tlaku  $2 \pm 0,5$  kPa. [17]

Takto je destilace ukončena. [17]



*Obr. 4.4 Rotační vakuové destilační zařízení*



## 4.9. Stanovení penetrace jehlou podle ČSN EN 1426

Podstatou zkoušky podle ČSN EN 1426 [20] je měření hloubky průniku jehly penetrometru do vytemperovaného vzorku asfaltového pojiva při teplotě  $25 \pm 0,1$  °C. Celkové použité zatížení je 100 g, které působí na jehlu po dobu 5 s. [18]

### 4.9.1. Postup zkoušky

Asfaltové pojivo získané z destilace (viz kapitola 4.8) se přelije do připravené nádoby. Naléváme jej tak, aby se na povrchu nevytvářely vzduchové bubliny. Zkušební vzorek se musí ochladit při laboratorní teplotě po dobu 1–2 hodiny. Nádoba se ihned přikryje, aby nedošlo k znečištění vzorku. Poté se vzorek umístí do vodní lázně na perforovanou podložku s řízenou teplotou a temperuje se na teplotu  $25 \pm 0,1$  °C. [18]

Do vytemperované vodní lázně na desce penetrometru (obr. 4.5) se vloží předem vytemperovaná nádobka se vzorkem. Výška hladiny vody nad povrchem vzorku musí být nejméně 10 mm. Jehla se zasune do držáku penetrometru. Stupnice penetrometru se nastaví na nulu a hrot jehly je nastaven tak, aby se lehce dotýkal povrchu zkoušeného asfaltového pojiva. Jehla se nechá působit po dobu 5 sekund zatížením 100 g. Hodnota penetrace se přečte na stupnici penetrometru. Postup provedeme třikrát. Jehly se po každém vpichu mění nebo čistí. Vzájemná vzdálenost jednotlivých vpichů i od stěn nádobky je minimálně 10 mm. Výsledná hodnota penetrace se určí pomocí aritmetického průměru získaného ze tří měření. [18]



Obr. 4.5 Penetrometr

## 4.10. Stanovení bodu měknutí podle ČSN EN 1427

Metodou stanovení bodu měknutí podle ČSN EN 1427 určujeme teplotu asfaltu. Když se asfalt nalije do kroužku předepsaných rozměrů a za předepsaných podmínek změkne natolik, že se protáhne na stanovenou míru vlivem tlaku kuličky, jež je umístěna na povrchu asfaltového vzorku. Podle ČSN EN 1427 [19]

### 4.10.1. Postup zkoušky

Připravíme si mosazné kroužky, které jsou umístěny na kovové destičce. Ta je předem potřena jemným filmem vazelíny, aby se po zchladnutí asfaltového pojiva mosazné kroužky daly snáze odebrat z podložky. Natřením podložky eliminujeme přilepení vzorku asfaltového pojiva k podložce. Do každého z kroužků se nalije mírný přebytek připraveného asfaltového vzorku. Ten se chladí při laboratorní teplotě, a to nejméně po dobu 30 minut. Poté se nahřátou špachtlí seřízne přečnávající vrstva asfaltu tak, aby byl povrch vzorku zarovnan s okrajem kroužku.

Kroužky se vzorkem jsou vloženy do otvorů na horní destičce stojanu. Mezi vzorky se zasadí teploměr a sestava se vloží do vodní lázně s destilovanou vodou vytemperovanou na  $5 \pm 1$  °C tak, aby povrch lázně byl  $50 \pm 3$  mm nad horním okrajem kroužků. Jakmile je dosaženo ve vodní lázni 5 °C, na povrch asfaltových vzorků v kroužcích umístíme kuličky a pomocí topné desky zahříváme vodní lázeň rychlostí 5 °C/min. [19]

Výslednou teplotu stanoví měřicí zařízení (obr. 4.6) u každého ze dvou vzorků v okamžiku, kdy se vzorek protáhne pod tlakem kuličky a dotkne se přístroje paprsku světla. Výsledkem zkoušky je průměr teplot pravého a levého kroužku. Zkouška se opakuje, pokud je rozdíl mezi dvěma teplotami větší než 1 °C. [19]



Obr. 4.6 Příklad na měření bodu měknutí

## 4.11. Stanovení komplexního smykového modulu a fázového úhlu v DSR podle ČSN EN 14770

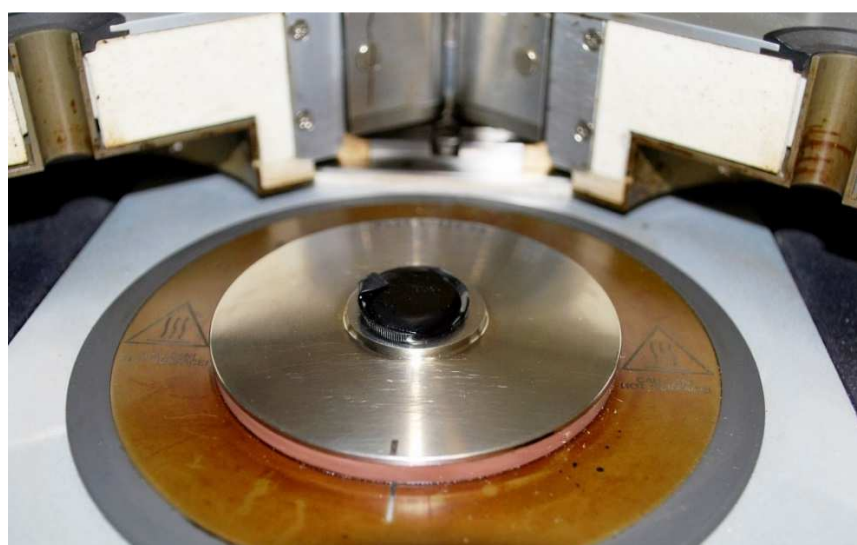
Postup této funkční zkoušky je popsán v normě ČSN EN 14770 [17]. Provádí se pomocí dynamického smykového reometru. [21]

Pro stanovení reologických vlastností asfaltových pojiv se běžně používají oscilační zkoušky. Oscilační zkoušky dokáží hodnotit viskózní a elastické vlastnosti pojiv, které mohou probíhat za různých teplot a v různých zatěžovacích frekvencích. [20] [22]

Vzorek asfaltového pojiva se umístí mezi dvě destičky. Spodní destička je pevná a horní destička je oscilující. Působením oscilujícího smykového napětí je vzorek pojiva namáhán sinusovým zatížením neboli oscilací, která odpovídá zatěžování vozovky. Podstatou zkoušky je určení smykového napětí a přetvoření za působení točivého momentu a úhlového pootočení. [20] [22]

### 4.11.1. Postup zkoušky

Pro stanovení komplexního smykového modulu byla vybrána zkouška oscilace s využitím geometrie velikosti 25 mm za zkušebních teplot 70 až 40 °C s odstupňováním po 5 °C. Nejprve se přístroj kalibruje. Následuje manuální určení počáteční zkušební teploty, která u tohoto typu zkoušky činí 70 °C, a vložení vzorku (obr. 4.7). Vzorek necháme změknout, spustíme horní geometrii a odstraníme přebytek pojiva tak, aby v okolí geometrie nebyl přebytek zkoušeného vzorku (obr. 4.8). [20] [22]



Obr. 4.7 Vzorek pojiva umístěný na geometrii DSR





*Obr. 4.8 Vzorek pojiva umístěný na geometrii DSR po očištění, připravený na měření*

Následně zvolíme zkoušku. Zkouška měří při frekvencích od 10 Hz do 0,1 Hz. Poté se sníží zkušební teplota o 5 °C a měření probíhá opět při snižující se frekvenci. Takto se postupuje až do konce zkoušky. Výsledky oscilační zkoušky se zobrazují nejčastěji graficky pomocí isochrony nebo isotermy. Isochrona je křivka vyjadřující chování pojiva při konstantní frekvenci. Isotherma je křivka vyjadřující chování pojiva při konstantní teplotě. Další možností grafického znázornění výsledku je Blackův diagram, který udává závislost mezi komplexním smykovým modulem a úhlem fázového posunu, nebo znázornění pomocí hlavních (kmenových) křivek, při jejichž konstrukci se využívá superpozice času a teploty. [20] [22]

## 4.12. Stanovení dynamické viskozity pomocí DSR podle ČSN EN 13702

Popis a význam dynamické viskozity je popsán v rešeršní části (viz kapitola 3.2). Dynamická viskozita je základní veličinou popisující chování asfaltových pojiv v reologii. Jedná se o tokové chování pojiv. Tato veličina určuje také odpor proti toku. Označuje se písmenem  $\eta$  a jednotkou je  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ . [20] [23]

Postup zkoušky je obdobný jako u měření komplexního smykového modulu. Zásadním rozdílem je použití horní geometrie tvaru kužele o průměru 40 mm a úhlu stoupání  $4^\circ$ . Rozdíl je také v konstantní teplotě zkoušky, která je stanovena na  $135^\circ\text{C}$ . Postupným zvyšováním smykové rychlosti z 1 na 100  $[\text{s}^{-1}]$  měříme narůstající smykové napětí, z kterého odvozujeme dynamickou viskozitu následujícím vzorcem (8). [20] [22] [23]

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$$

*Smykové napětí (dynamická viskozita) (8) [23]*

kde:  $\tau$  ... smykové napětí  $[\text{Pa}]$   
 $\eta$  ... dynamická viskozita  $[\text{Pa} \cdot \text{s}]$   
 $\dot{\gamma}$  ... smyková rychlost (přetvoření)  $[\text{s}^{-1}]$

## **5 POUŽITÉ INOVATIVNÍ ZKUŠEBNÍ METODY ROZPOZNÁNÍ R-MATERIÁLU V ASFALTOVÝCH SMĚSÍCH**

### **5.1. Metoda geologické analýzy**

Metoda geologické analýzy je postavena na předpokladu rozdílné geologie použitého kameniva nově dávkovaného do asfaltové směsi a kameniva použitého v R-materiálu. Obecně není přílišným trendem třídit R-materiál dle vrstev a typu. Z tohoto důvodu je obvyklé, že R-materiál obsahuje různé typy kameniva.

Tato metoda proto předpokládá, že přidaný R-materiál bude tvořen jiným kamenivem, než jaké je přidáváno do směsi jako nové. Velmi vhodné pro tuto metodu je mít znalosti z geologie nového kameniva (zdroj).

### **5.2. Metoda černé skály**

Jedná se o optickou metodu. Ta předpokládá, že před ukončením promývání při extrakci pojiva (viz kapitola 4.7) zůstanou na kamenivu R-materiálu pozůstatky filmu tzv. černé skály. Předpoklad se opírá o zkušební metodu částečné extrakce popsanou v předchozí rešerši (viz kapitola 3.7.2). Tento pozůstatek filmu černé skály budeme schopni opticky rozeznat na očištěném kamenivu a predikovat tak přítomnost R-materiálu.

## 5.3. Metoda postupné extrakce

Metoda postupné extrakce rozvíjí metodiku zjišťování přítomnosti R-materiálu v asfaltové směsi pomocí funkčních a reologických zkoušek asfaltových pojiv. Předpokládá vrstevnatost struktury pojiva ve směsi obsahující R-materiál a rozdílnou tloušťku asfaltového filmu na novém kamenivu a kamenivu R-materiálu (viz kapitola 3.5.). Předlohou pro praktickou aplikaci byla studie popsaná v části diplomové práce pod názvem Černá skála (viz kapitola 3.4.). Předpokládá podobný průběh zkoušky, jakou autoři studie využili při dokazování přítomnosti vrstevnaté struktury na kamenivu R-materiálu.

Metoda postupné extrakce aplikuje stejný princip jako metoda černé skály, ale na jiný problém. Snaží se dokázat vrstevnatou strukturu pojiva na povrchu zrn kameniva v asfaltové směsi obsahující R-materiál.

### 5.3.1. Princip metody

Zkouška podrobí směs postupnému rozpouštění pojiva v rozpouštědle. Rozpouštění bude provedeno dvakrát ve stanoveném čase. Následovat bude promývání s cílem získat veškeré zbylé pojivo. Takto získané vzorky rozpuštěného pojiva je před znovuzískáním pomocí destilace (viz kapitola 4.8) potřeba vyčistit od filerických částic a nečistot pomocí přístroje na extrakci pojiva (viz kapitola 4.7.).

Znovuzískané pojivo bude podroběno funkčním a reologickým zkouškám popsaným v kapitolách 4.9, 4.10, 4.11 a 4.12.

Cílem zkušební metody je separovat různé vrstvy asfaltového pojiva a vzájemně je porovnat. Předpokládá se, že první extrakce bude obsahovat převážně pojivo nové, umístěné v nejvzdálenější vrstvě od zrna kameniva, tedy pojivo měkčí. Druhá extrakce bude obsahovat pojivo bližší zrnu kameniva, tedy převážně směs pojiva R-materiálu i nově přidaného pojiva. Třetí extrakcí by se pak mělo získat nejtvrďší pojivo, umístěné nejbližší zrnu kameniva, které je nejlépe navázáno na kamenivo R-materiálu.

### 5.3.2. Postup metody

Zkoušená asfaltová směs se musí rozdrobit a rozdělit na hrubé částice a shluky. Největší rozměr shluku nesmí být větší než 6 mm. Z takto připravené směsi se odeberou 2 kg vzorku, který se vloží do sítové nádoby (obr. 5.1) určené pro rozpouštění asfaltové směsi v tetrachloretylenu.



*Obr. 5.1 Naplněná síťová nádoba vpravo, přebytek homogenizovaného vzorku vlevo*

Následuje postupná extrakce pojiva. Směs je postupně ve dvou nádobách rozpouštěna v tetraethylenu po dobu tří minut (obr. 5.2). Následuje očištění zbylé směsi (viz kapitola 4.7.). Stejně se musí vyčistit oba předešlé extrakty, aby byly vzorky zbaveny jemných částic a nečistot. Následuje zpětná destilace a zkoušení znovuzískaného pojiva. Celý proces je popsán schematicky na následujícím obrázku (obr. 5.3).





Obr. 5.2 Nádoby na rozpouštění vzorku pro dvě extrakce vlevo, vzorek v sítové nádobě vpravo



Obr. 5.3 Schéma průběhu postupné extrakce

### 5.3.3. Vyhodnocení metody

Vyhodnocení metody probíhá naprosto stejně jako u předem zmiňovaných zkoušek (viz kapitoly 4.9, 4.10, 4.11 a 4.12). Rozdíl je pouze v trojnásobném počtu zkoušek, které odpovídají třem získaným referenčním pojivům. Takto vyhodnocené jednotlivé extrakce se mezi sebou vzájemně porovnají.

## 6 PRAKTICKÁ ČÁST

Tato část diplomové práce se zabývá vlastním měřením zkušebních vzorků, podle již předem popsanych zkušebních metod. Analýza dat je odvozena z části rešeršní a znalostí nabytých v průběhu studia. Cíle měření jsou popsány v úvodu diplomové práce (viz kapitola 2).

### 6.1. Finální návrh zkušebních metod predikujících přítomnost a množství R-materiálu v asfaltových směsích

Tato část dopředu shrnuje veškerá zjištění této diplomové práce, ze kterých odvozuje matematické rovnice predikujících přítomnost a množství R-materiálu v asfaltových směsích. Z důvodu přehlednosti a následnému využití vyvinuté metody v následujícím textu je tato výsledná metodika uvedena již zde.

Zásadním aspektem pro návrh metody je možnost využití dynamického smykového reometru (DSR). Pokud laboratoř tento přístroj nevlastní dokáže predikovat pouze přítomnost R-materiálu. Pokud DSR k dispozici máme, jsme na základě vyhodnocení dosažených výsledků této práce schopni odhadnout i množství R-materiálu ve směsi.

Z tohoto důvodu uvádím návrh dvou zkušebních metod, které byly sestaveny na základě rešeršních prací a na základě vyhodnocení výsledků laboratorních zkoušek provedených v rámci této diplomové práce. Navržené metody jsou v dalším textu ověřeny provedením laboratorních zkoušek na referenčních materiálech.

#### 6.1.1. Metoda postupné extrakce bez použití DSR

Metoda vychází z aplikace postupné extrakce popsané v kapitole 6.4. Z takto zpracované asfaltové směsi získáme tři vzorky pojiva, které podrobíme zkouškám penetrace jehlou a bodu měknutí. Také získáme vzorek kameniva, který lze podrobit zkoušce optického posouzení tzv. černé skály (viz kapitola 5.2.).

### 6.1.1.1 Zkouška černé skály

Omyté kamenivo podrobíme optické diagnostice přítomnosti černé skály. Pokud jsou na kamenivu patrné pozůstatky černé skály, můžeme prohlásit, že směs obsahuje R-materiál.

### 6.1.1.2 Zkouška penetrace jehlou podle ČSN EN 1426

Zkouška vychází z dat v kapitole 6.3.6, ale především v kapitole 6.5.1. Toto měření obsahuje hodnoty penetrace všech extrakcí a je pro ilustraci metody nejpřehlednější. Předpokladem je sestupná tendence hodnot penetrace u jednotlivých extrakcí. Přítomnost R-materiálu se stanoví z níže uvedeného vzorce (9).

$$Pe_{1ex} - Pe_{2ex} \geq 2$$

*Přítomnost R-materiálu určená z penetrace (9)*

$Pe_{1ex}$     *Hodnota penetrace první extrakce [Pn]*

$Pe_{2ex}$     *Hodnota penetrace druhé extrakce [Pn]*

Pokud je výrok pravdivý, pak směs obsahuje R-materiál.

### 6.1.1.3 Zkouška bodu měknutí podle ČSN EN 1427

Zkouška se opírá o data vyhodnocená v kapitole 6.5.2. Předpokládá výrazný rozdíl v bodech měknutí mezi první a druhou extrakcí. Přítomnost R-materiálu se určí z následujícího vzorce (10).

$$Bm_{2ex} - Bm_{1ex} \geq 1$$

*Přítomnost R-materiálu určená z bodů měknutí (10)*

$Bm_{1ex}$     *Bod měknutí první extrakce [°C]*

$Bm_{2ex}$     *Bod měknutí druhé extrakce [°C]*

Pokud je výrok pravdivý, směs obsahuje R-materiál.



#### **6.1.1.4 Vyhodnocení**

V závěru zkoušky budeme mít k dispozici tři závěry na podporu, nebo vyvrácení tvrzení, jestli směs R-materiál obsahuje, nebo nikoliv.

#### **6.1.2. Metoda postupné extrakce s možností použití DSR**

Tento postup považuji za hlavní výsledek diplomové práce. Tato metoda je schopna zjistit přítomnost R-materiálu a částečně také odhadnout množství R-materiálu přidaného do směsi. Důvod, proč používám slovo částečně, bude vysvětlen v závěru. Metoda vychází z aplikace postupné extrakce (viz kapitola 6.4). Takto získáme tři pojiva reprezentující jednotlivé extrakce. Dále je potřeba vyextrahovat pojivo z referenčního vzorku standardním postupem. Tím získáme pojivo definující směs. Tato pojiva budou podrobena zkoušce oscilace v DSR při teplotě 60 °C pro získání hodnot komplexních smykových modulů.

Důvodem, proč takto radikálně redukuji reologické zkoušky, je časová náročnost měření. Nelze zpochybnit význam kompletní reologické zkoušky pro diagnostiku vlastností pojiva, ale popsání celkového reologického chování pojiva při různých okrajových podmínkách není předmětem této metody. Pro účely diagnostiky množství R-materiálu nám stačí stanovit pro každé pojivo zvlášť komplexní smykový modul při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz.

##### **6.1.2.1 Zkouška černé skály**

Zkoušku uvádím pouze pro předběžnou predikci přítomnosti R-materiálu. Jedná se o doplňkovou zkoušku, kterou není nutné provádět.

Omyté kamenivo rozpouštědlem podrobíme optické diagnostice přítomnosti černé skály. Pokud jsou na kamenivu patrné pozůstatky černé skály, můžeme prohlásit, že směs obsahuje R-materiál.

##### **6.1.2.2 Vyhodnocení komplexního smykového modulu v DSR podle ČSN EN 14770**

Výsledkem budou čtyři naměřené hodnoty komplexního smykového modulu. Tři výsledky budou definovat vlastnosti pojiv získaných postupnou extrakcí popsanou v kapitole 5.3. Poslední výsledek komplexního smykového

modulu bude definovat vlastnosti pojiva běžným postupem znovuzískaného z referenční směsi.

Pro účely výpočtu by stačily hodnoty první a druhé extrakce. Studie zatím nedokáže s určitostí popsat dosahované výsledky vlastností pojiva získaného ze třetí extrakce, a proto do výpočtového modelu nebyly zahrnuty.

### 6.1.2.3 Výpočet

**Přítomnost R-materiálu podle vzorce 11.**

Popisuje zjištění popsaná v kapitole 6.5.4 a 6.6.1. Výsledek nám říká, že vzorek má vrstevnatou strukturu s tvrdostí vyšší než první extrakce. To jednoznačně stanoví přítomnost R-materiálu, který se v první extrakci výrazně neprojeví, ale celkově zásadně pozmění komplexní smykový modul výsledné směsi.

$$G_{sm}^* > G_{1ex}^*$$

*Přítomnost R-materiálu určená z komplexního smykového modulu (11)*

$G_{1ex}^*$  komplexní smykový modul 1 extrakce při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz [kPa]

$G_{sm}^*$  komplexní smykový modul 2 extrakce při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz [kPa]

Pokud je rovnice pravdivá, můžeme tvrdit, že směs R-materiál obsahuje.

## Množství R-materiálu ve směsi podle vzorce 12.

Tento výpočet lze použít pouze v případě platnosti vzorce 11. Ten nám říká, že se jedná o směs s R-materiálem. Pokud aplikujeme výpočet na směs bez R-materiálu nebo pouze na R-materiál, výpočet nebude platný z důvodu jiné vrstevnaté struktury, respektive jiného řazení tvrdosti vrstev.

$$R_{mat} = \left(1 - \frac{G_{sm}^* - G_{1ex}^*}{G_{2ex}^* - G_{1ex}^*}\right) * 100$$

*Přibližné množství R-materiálu určené z komplexního smykového modulu (12)*

- $R_{mat}$  množství obsaženého R-materiálu v referenční směsi [%]  
 $G_{1ex}^*$  komplexní smykový modul 1 extrakce při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz [kPa]  
 $G_{2ex}^*$  komplexní smykový modul 2 extrakce při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz [kPa]  
 $G_{sm}^*$  komplexní smykový modul referenční směsi při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz [kPa]

Uvedený vzorec nám dává hrubý odhad množství R-materiálu v procentech celkové hmotnosti asfaltové směsi.

Vzorec zároveň definuje dosavadní zjištění a je mnou považován za výchozí bod, od kterého by se vývoj metody mohl odrazit. Vlivy způsobující nepřesnosti dané metody shrnuji na závěr této práce v kapitole 7. (Doporučení).

## 6.2. Použité materiály

Zadání diplomové práce v původním znění, předpokládala výrobu vlastních referenčních směsí. To by sice možné bylo, ale ve vztahu k problematice popsané v rešeršní části (viz. Kapitola 3.6.1.), jsem po dohodě s vedoucím práce upřednostnil možnosti odebrat referenční směsi přímo na obalovně.

Pro určení přítomnosti R-materiálu, byla zvolena referenční směs asfaltového betonu pro ložní vrstvy ACL 16 s použitím pojiva 50/70. Druhý vzorek byl vyroben stejnou recepturou obohacenou o 25 % R-materiálu. Dále jsem měl k dispozici R-materiál přidávaný do této směsi.

Pracujeme tedy s třemi vzorky:

- A. ACL 16 – asfaltový beton pro ložní vrstvy se zrnitostí kameniva do 16 mm bez R-materiálu s asfaltem 50/70
- B. ACL 16; 25 % R-mat-asfaltový beton pro ložní vrstvy se zrnitostí kameniva do 16 mm s asfaltem 50/70 a s 25 % R-materiálu
- C. R-materiál –R-materiál použitý pro výrobu směsi ACL 16; 25 % R-mat.

Na těchto třech referenčních materiálech byly výše popsané postupy odzkoušeny a na základě porovnání výsledků byly vyvinuty zkušební metody na rozpoznání přítomnosti R-materiálu v asfaltové směsi. Ověření vyvinutých zkušebních metod bylo provedeno na třech referenčních vzorcích směsí s příměsí R-materiálu.

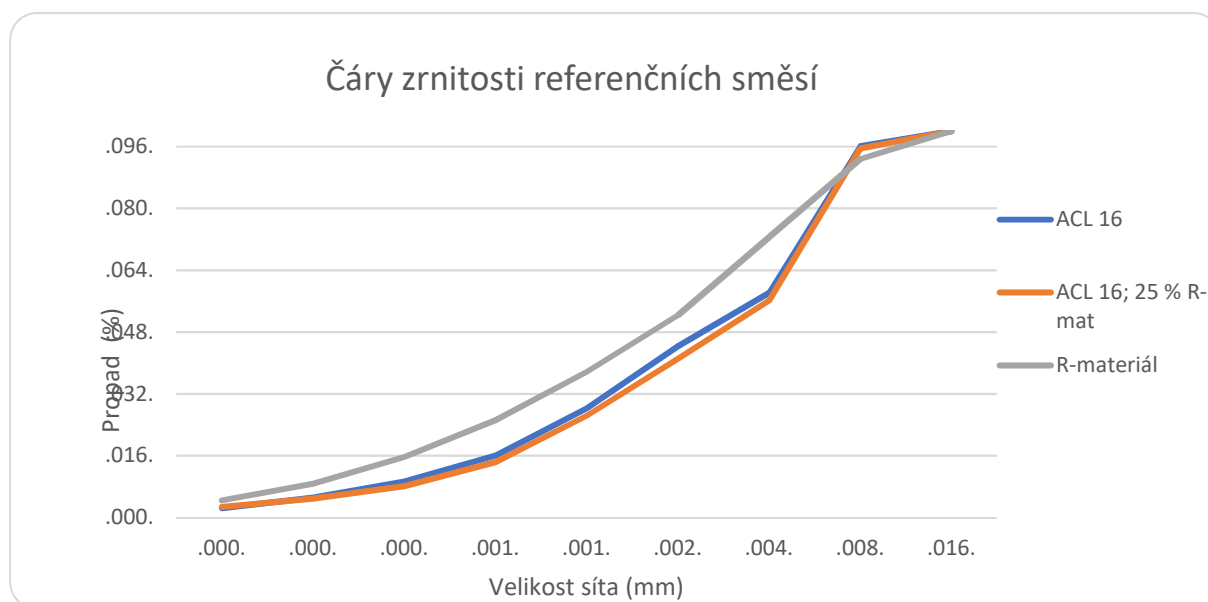
- A. ACL 16; 25 % R-mat-asfaltový beton pro ložní vrstvy se zrnitostí kameniva do 16 mm s asfaltem 50/70 a s 25 % R-materiálu
- B. ACO 11; 50 % R-mat-asfaltový beton pro obrusné vrstvy se zrnitostí kameniva do 11 mm s asfaltem 70/100 a s 50 % R-materiálu.
- C. ACP 16+; 40 % R-mat-R-mat-asfaltový beton pro podkladní vrstvy se zrnitostí kameniva do 16 mm s asfaltem 50/70 a s 40 % R-materiálu

## 6.3. Vyhodnocení konvenčních zkušebních postupů pro detekci přítomnosti R-materiálu

V této části jsou popsány výsledky konvenčních zkoušek asfaltových směsí a pojiv. Vyhodnoceny jsou vzorky ACL 16, ACL 16; 25 % R-mat a R-materiál. Hodnoceny jsou pro vhodnost predikce přítomnosti R-materiálu v asfaltových směších. Nezabývám se tedy striktně kvalitativním posudkem, ale porovnáním výsledků směsi s R-materiálem a bez něj.

### 6.3.1. Vyhodnocení zrnitosti podle ČSN EN 933-1

Zkušební metoda je podrobně popsána v části diplomové práce zabývající se popisem zkušebních metod (4.1). Výsledky zrnitostí byly stanoveny pro směsi ACL 16, ACL 16; 25 % R-mat, R-mat a jsou zobrazeny v (graf 6.1). [12]



Graf 6.1 Čáry zrnitostí referenčních vzorků

Z čar zrnitosti se potvrzuje obecně akceptovaná teorie, že drcení R-materiálu způsobí zvýšení procentuálního zastoupení jemnějších frakcí. Tento fakt je brán jako negativní aspekt používání R-materiálu.

Také je ale patrné, že výroba směsi s R-materiálem tento jev dokáže eliminovat. Z grafu lze totiž vyčíst také to, že směs bez R-materiálu má mírně vyšší zastoupení jemných částic.

Domnívám se, že stanovení křivky zrnitosti z pohledu diagnostiky R-materiálu nemá dostatečně průkazný potenciál. Zastoupení kameniva je jednoduše

ovlivnitelné prvotním návrhem, který přítomnost jemnější částic obsažených v R-materiálu predikuje a následně je schopen jej kompenzovat ve finálním návrhu.

### 6.3.2. Vyhodnocení mezerovitosti asfaltových směsí podle ČSN EN 12697-8

Tato zkušební metoda je podrobně popsána v předešlé části diplomové práce (viz kapitola 4.6). Mezerovitost vychází z objemové hmotnosti asfaltových těles a maximální objemové hmotnosti, jejichž vyhodnocení teprve bude následovat. Ovšem pro zvolení vhodných matematických postupů je nutné mezerovitost určit již nyní. Pokud je mezerovitost nižší než 7 %, je možno použít matematický postup (viz kapitola 4.6). Mezerovitost byla v našem případě stanovena opět u směsi ACL 16 a ACL 16; 25 % R-mat (tab. 6.1). [15]

Mezerovitost $V_m$ (%)	
ACL 16	6,13
ACL 16; 25 % R-mat	4,63

Tab. 6.1 Mezerovitost směsi ACL 16 a ACL 16 25 % R-mat

Asfaltová směs ACL 16; 25 % R-mat obsahuje větší množství pojiva, a tím je dosaženo nižší mezerovitosti. Příčinou tohoto jevu ale může být znovu rozdílná křivka zrnitosti. Při přibližování se k ideální křivce, tzv. Fullerově parabole, se bude mezerovitost také snižovat. [7]

Pro účely diagnostiky R-materiálu nepovažují mezerovitost jako průkaznou. Tuto charakteristiku lze totiž ovlivnit návrhem směsi.

### 6.3.3. Vyhodnocení objemové hmotnosti z asfaltových zkušebních těles podle ČSN EN 12697-6+A1

Zkušební metodou s objemovou hmotností se podrobně zabývám v kapitole 4.4. V této praktické části proto rovnou vyhodnocuji výsledky směsí ACL 16 a ACL 16; 25 % R-mat (tab. 6.2). [13]

Objemová hmotnost $\rho_{\text{bssd}}$ (kg/ m <sup>3</sup> )		
	ACL 16	ACL 16; 25 % R-mat
SSD	2484	2503

Tab. 6.2 Objemová hmotnost směsi ACL 16 a ACL 16; 25 % R-mat

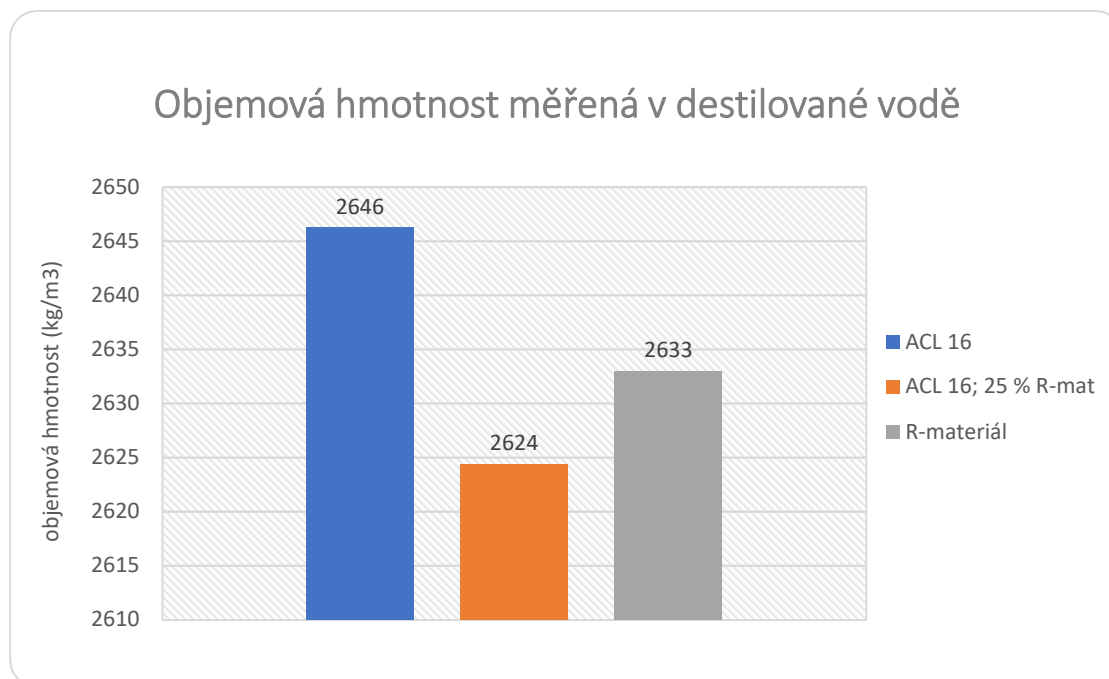
Objemová hmotnost obou směsí je ovlivněna složením směsi a použitými materiály. Z pohledu predikce obsahu R-materiálu ve směsích nepovažují objemovou hmotnost jako průkazný ukazatel, protože tuto charakteristiku lze ovlivnit již návrhem směsi.

#### 6.3.4. Vyhodnocení maximální objemové hmotnosti podle ČSN EN 12697-5+A1

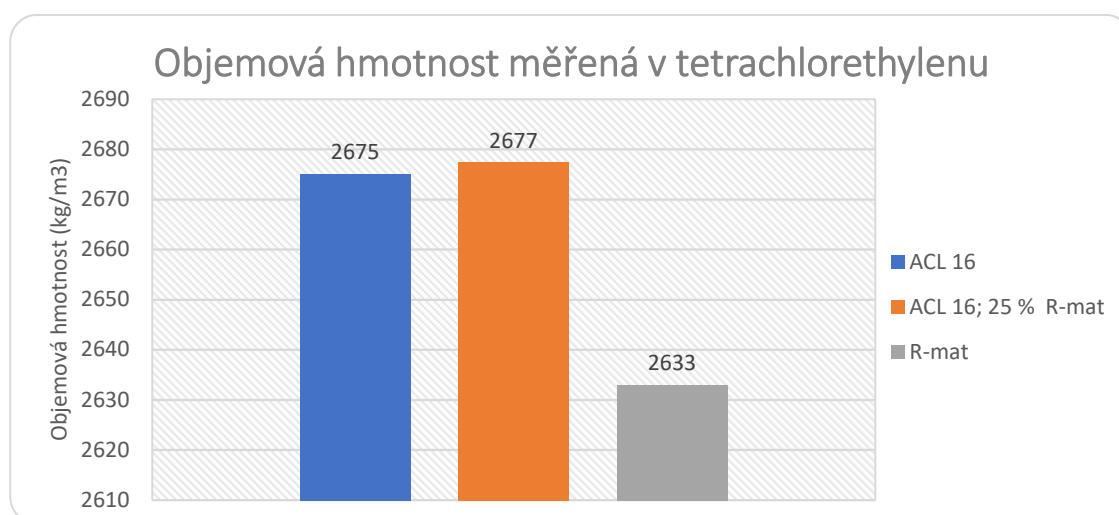
Zkušební metodu s maximální objemovou hmotností podrobně popisuje kapitola 4.5. V této části bude vyhodnocena maximální objemová hmotnost na směsích ACL 16, ACL 16; 25 % R-mat a R-materiál. Tato volumetrická zkouška byla provedena jak v rozpouštědle tetrachloretylenu (tab. 6.3 a graf 6.1), tak v destilované vodě (tab. 6.3 a graf 6.2). [14]

Maximální objemová hmotnost $\rho_{\text{mv}}$ (kg/m <sup>3</sup> )			
	ACL 16	ACL 16; 25 % R-mat	R-mat
Tetrachlorethylen	2675	2677	2633
Destilovaná voda	2646	2624	2632

Tab. 6.3 Maximální objemová hmotnost směsi ACL 16, ACL 16; 25 % R-mat a R-mat



Graf 6.2 Srovnání maximální objemové hmotnosti u referenčních směsí ve vodě



Graf 6.3 Srovnání maximální objemové hmotnosti u referenčních směsí v tetrachlorethylenu

Z naměřených dat není náš předpoklad provedené zkoušky průkazný. Zkouška totiž předpokládá, že při zvětšujícím se podílu pojiva ve směsi bude maximální objemová hmotnost klesat. Teoreticky by tedy měla objemová hmotnost R-materiálu být výrazně vyšší nebo úplně nejvyšší. Výsledky však mohou být zkresleny různou objemovou hmotností nově přidaného kameniva a kameniva obsaženého v R-materiálu.

Z uvedených důvodů nepovažuji stanovení maximální objemové hmotnosti za průkaznou zkoušku pro predikci R-materiálu ve směsích. Objemovou hmotnost směsi lze upravovat návrhem směsi a použitými vstupními materiály.

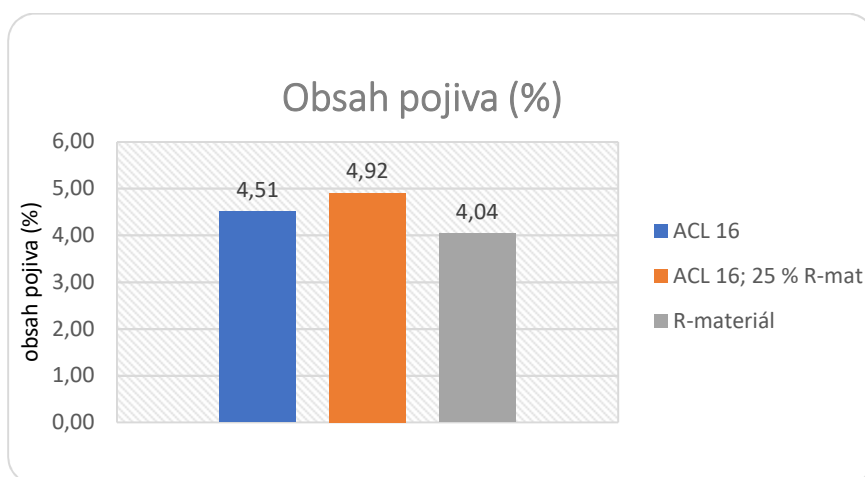


### 6.3.5. Vyhodnocení obsahu pojiva ve směsi

Zkušební metoda je již podrobně popsána v části diplomové práce zabývající se obecně popisem zkušebních metod (viz kapitola 4.2). Obsah rozpustného pojiva je stanoven pro všechny tři referenční směsi (tab. 6.4 a graf 6.4). [16]

Obsah pojiva ve směsi (%)		
ACL 16	ACL 16; 25 % R-mat	R-materiál
4,5	4,9	4,0

Tab. 6.4 Obsah pojiva referenčních směsí



Graf 6.4 Obsah pojiva referenčních směsí

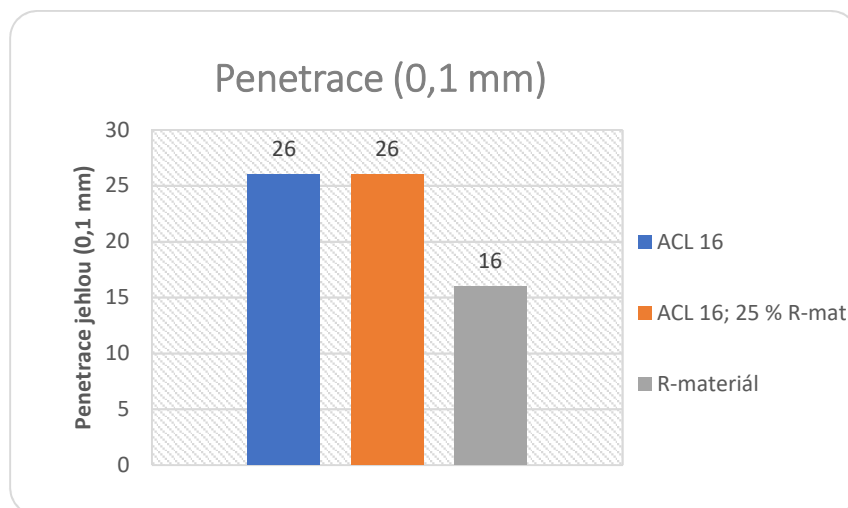
Obsah pojiva je přímo dán návrhem směsi, proto nepovažuji stanovení obsahu pojiva za zkoušku adekvátní pro určení přítomnosti R-materiálu.

### 6.3.6. Vyhodnocení penetrace jehlou podle ČSN EN 1426

Penetrace jehlou je podrobně popsána v části diplomové práce zabývající se popisem zkušebních metod (viz kapitola 4.9). V této zkoušce jsou hodnocena pojiva, která byla znovuzískána ze všech tří referenčních směsí (tab. 6.5 a graf 6.5). [18]

Penetrace (0,1 mm)		
ACL 16	ACL 16; 25 % R-mat	R-materiál
26	26	16

Tab. 6.5 Penetrace referenčních směsí



Graf 6.5 Penetrace referenčních směsí

Z hodnot penetrace je patrné, že vliv přítomnosti R-materiálu je zanedbatelný. Penetrace u R-materiálu jasně dokazuje, co způsobuje stárnutí. Zajímavým úkazem této metody je to, že hotová směs po výrobě zásadně sníží své penetrační vlastnosti z 50 až 70 penetračních jednotek (asfalt 50/70) na 26 penetračních jednotek. Zkouška pomocí penetrace jehlou má nízkou rozlišovací schopnost na to, aby při nízkém dávkování (25 %) rozeznala tvrdost pojiva vzniklou přidáním R-materiálu od tvrdosti pojiva zapříčiněné výrobními procesy obalovny (např. doba a teplota zahřívání atd.).

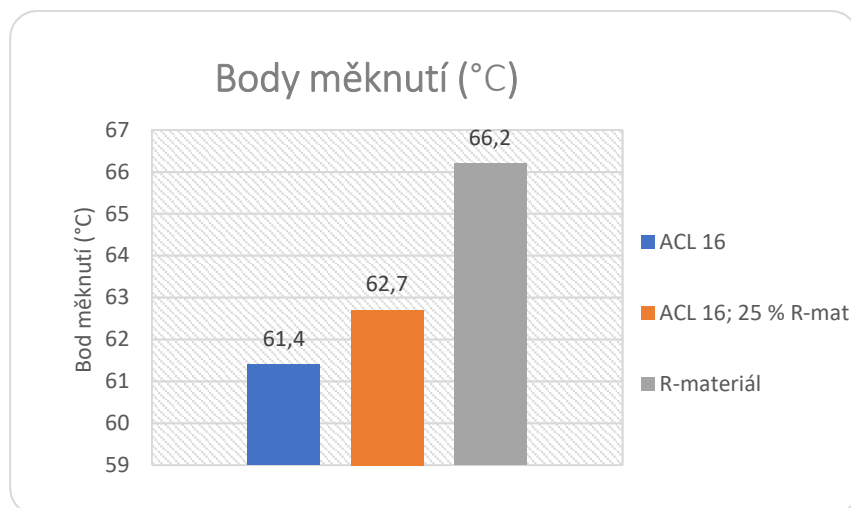
Zkoušku penetrace jehlou pro predikci R-materiálu v asfaltových směších shledávám vzhledem k její nízké rozlišovací hodnotě zestárých pojiv jako krajně nevhodnou.

### 6.3.7. Vyhodnocení bodu měknutí podle ČSN EN 1427

Tato zkušební metoda je stejně jako předchozí metody zmíněna již v teoretické části diplomové práce (viz podrobněji kapitola 4.10). V této zkoušce jsou hodnoceny všechny referenční vzorky (tab. 6.6 a graf 6.6). [19]

Bod měknutí (°C)		
ACL 16	ACL 16; 25 % R-mat	R-materiál
61,4	62,7	66,2

Tab. 6.6 Body měknutí referenčních směsí



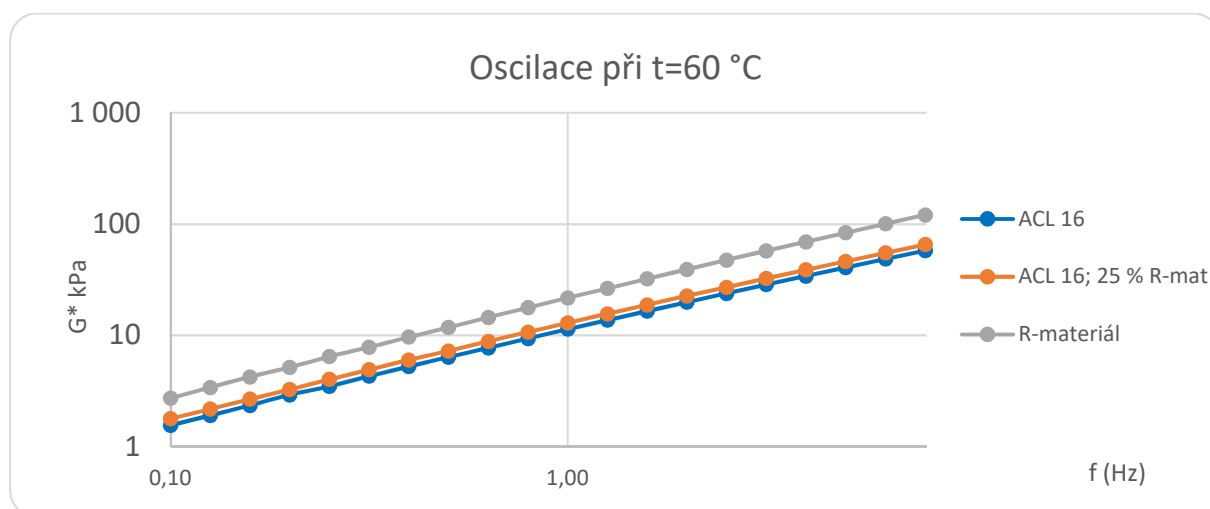
Graf 6.6 Body měknutí referenčních směsí

Z výsledků bodu měknutí je patrné, že přítomnost R-materiálu zvýšila podle očekávání hodnotu bodu měknutí pojiva znovuzískaného ze směsi. Pojivo z R-materiálu má mnohem vyšší bod. Přidáváním podílu R-materiálu do směsí bude úměrně stoupat i jeho bod měknutí, což znázorňuje graf 6.6.

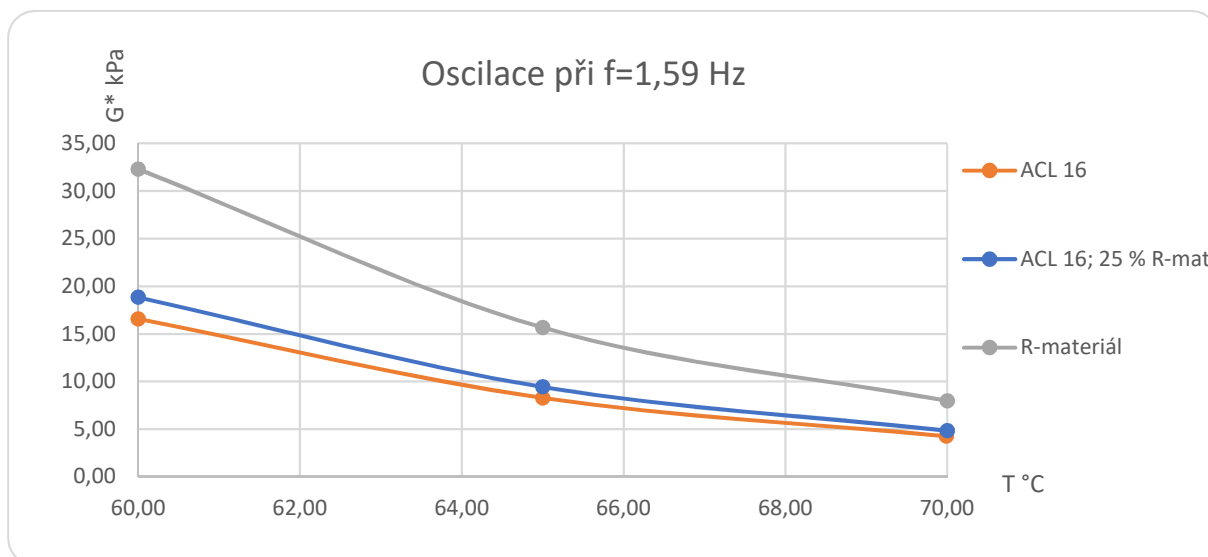
Bod měknutí je konečně průkaznou metodou pro určení R-materiálu.

### 6.3.8. Vyhodnocení komplexního smykového modulu a fázového úhlu v DSR podle ČSN EN 14770

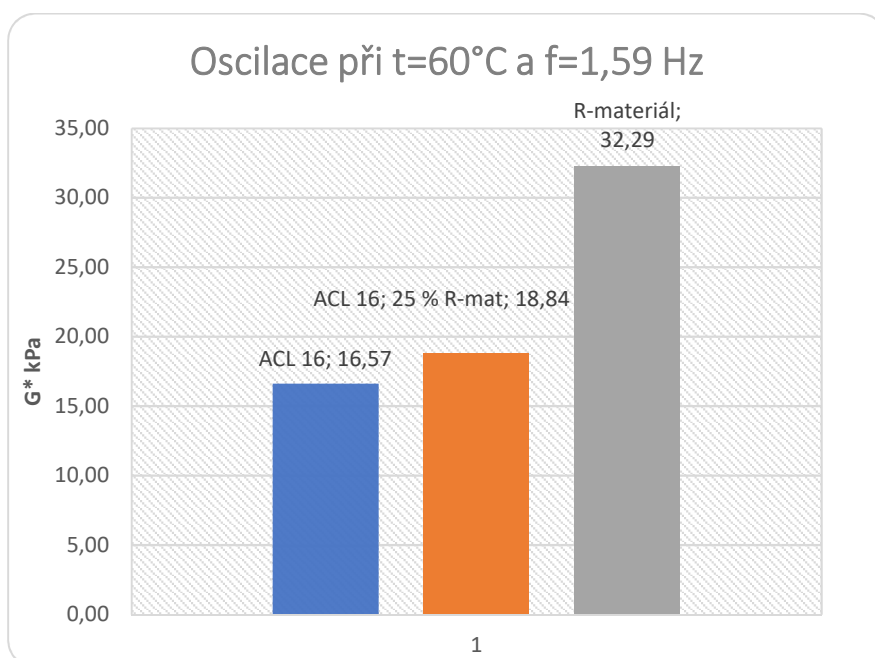
Touto zkušební metodou se podrobněji zabývá předešlá část diplomové práce s obecným popisem zkušebních metod (viz kapitola 4.11). V této zkoušce jsou hodnoceny všechny referenční vzorky (graf 6.7, 6.8, 6.9 a 6.10). [21]



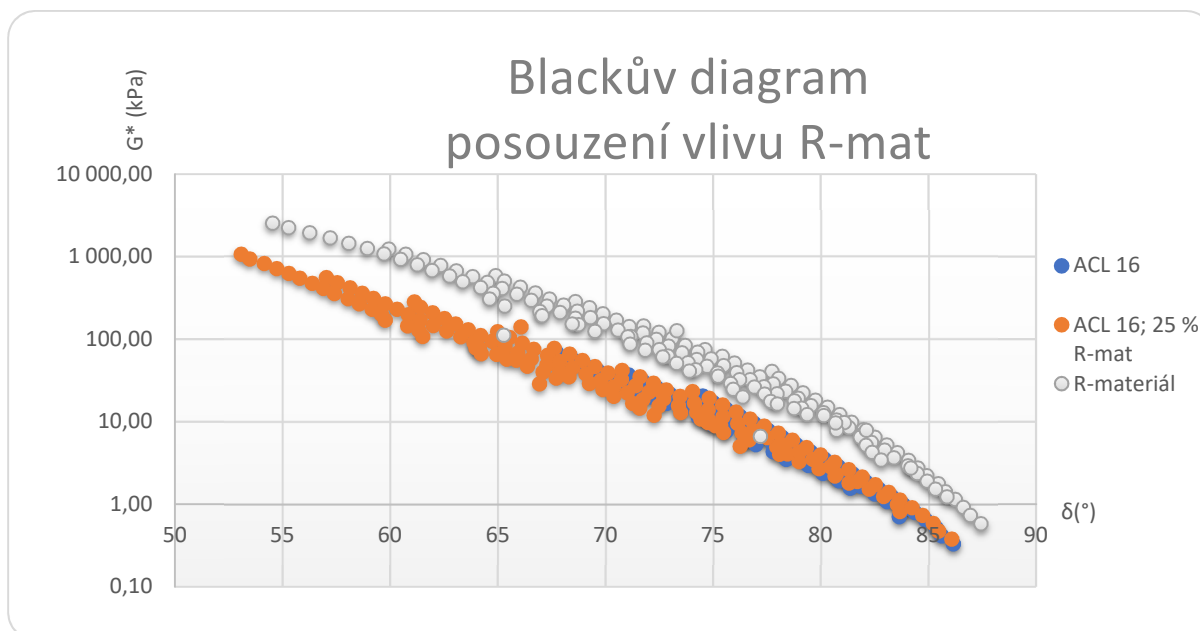
Graf 6.7 Komplexní smykové moduly referenčních směsí při teplotě 60 °C



Graf 6.8 Komplexní smykové moduly referenčních směsí při  $f = 1,59$  Hz



Graf 6.9 Komplexní smykové moduly referenčních směsí při  $f = 1,59$  Hz a teplotě  $t = 60^{\circ}\text{C}$



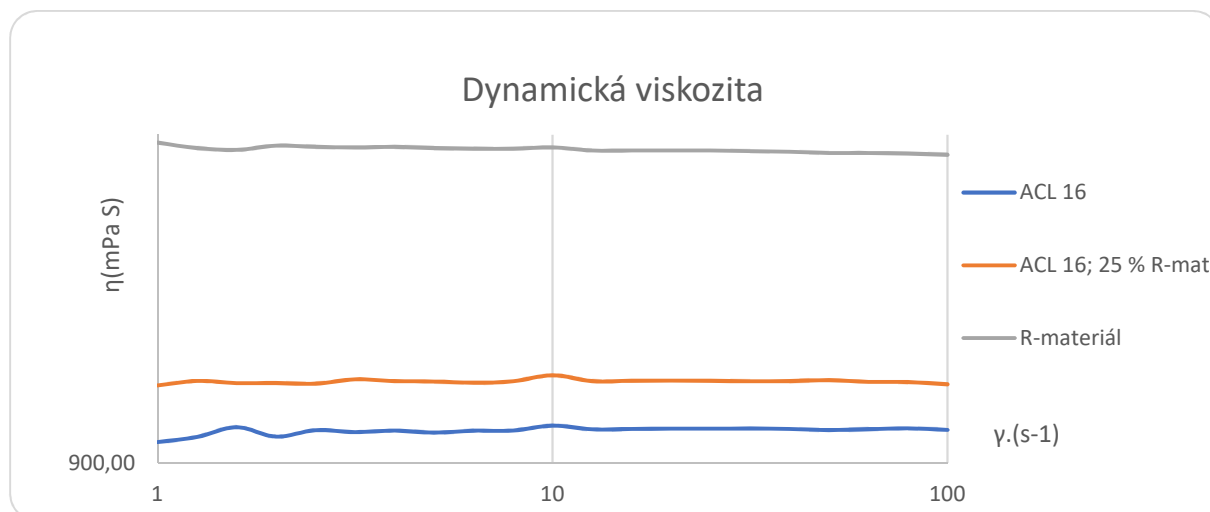
Graf 6.10 Blackův diagram referenčních směsí

Z grafů je na výsledcích komplexních smykových modulů znovuzískaných pojiv patrný vliv přítomnosti R-materiálu v asfaltové směsi. Pojiva jsou zásadně ovlivněna přítomností R-materiálu, který má výrazně vyšší komplexní smykový modul. Z Blackova diagramu (graf 6.10) lze vyčíst rozdíl v elasticitě zkoušených směsí. R-materiál vykazuje zásadně elastičtější, tedy tužší vlastnosti, než jaké jsou obvyklé u konvenčně používaných pojiv ve směsích.

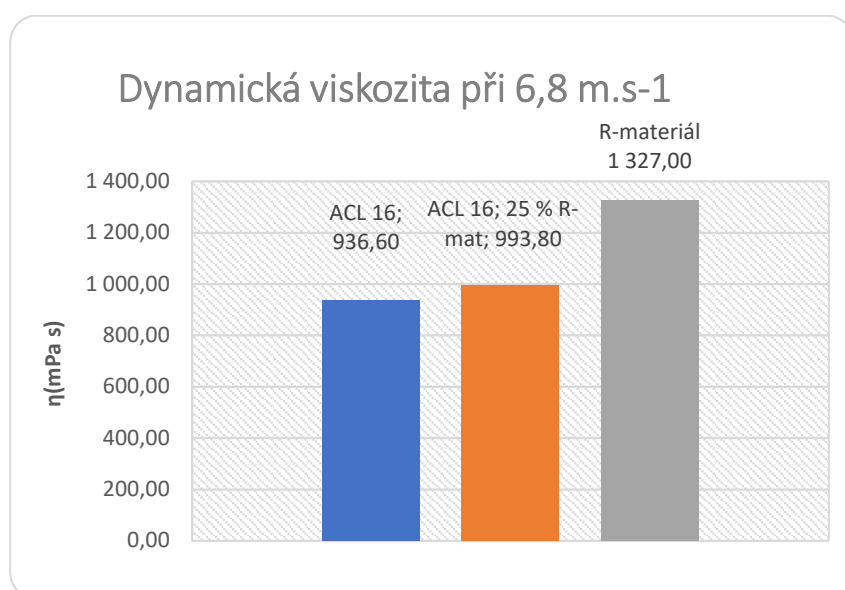
Metodu porovnání komplexních smykových modulů považují za velmi vhodnou pro predikci přítomnosti R-materiálu v asfaltových směsích.

### 6.3.9. Vyhodnocení dynamické viskozity pomocí DSR podle ČSN EN 13702

Zkušební metodě se blíže věnujeme v předchozí části diplomové práce zabývající se popisem zkušebních metod (viz kapitola 4.12). V této zkoušce jsou opět hodnoceny všechny referenční vzorky (graf 6.11 a 6.12).



Graf 6.11 Dynamická viskozita referenčních vzorků



Graf 6.12 Dynamická viskozita referenčních vzorků při rychlosti otáčení 6,8 m s<sup>-1</sup>

Z naměřených výsledků je patrné, že s přibývajícím obsahem R-materiálu narůstá hodnota viskozity znovuzískaného pojiva. To je v souladu s obecně známými předpoklady.

Dynamickou viskozitu z výše uvedených důvodů pokládám za vhodnou pro diagnostiku R-materiálu ve směsích.

### 6.3.10. Shrnutí a doporučení

Při vyhodnocování konvenčních zkušebních metod je třeba primárně vzít v potaz to, za jakých podmínek bylo možné predikovat přítomnost R-materiálu. Zásadní je, že k dispozici byly dané takové referenční vzorky, které měly k identifikaci R-materiálu předpoklady. Těchto konkrétních podmínek nelze ve skutečnosti dosáhnout. V ideálním případě bychom sice mohli získat vzorek R-materiálu, ale v drtivé většině případů budeme mít k dispozici pouze jeden vzorek směsi, která navíc bude obsahovat neznámé množství R-materiálu.

I přes tento fakt nám vyhodnocovací část poskytla zásadní poznatky, z kterých budeme ještě dále vycházet. Za průkazné metody pro predikci R-materiálu považuji zkoušky bodu měknutí, komplexního smykového modulu a dynamické viskozity znovuzískaných pojiv z dané asfaltové směsi.

Naopak za neprůkazné metody pro predikci R-materiálu označuji veškeré zkoušky, které jsme v této diplomové práci testovali na směsích. Metoda penetrace jehlou prováděná na znovuzískaném pojivu rovněž pro její nízké rozlišovací schopnosti hodnotím jako slabou, nedostatečnou, a tudíž neprůkaznou.

## 6.4. Vyhodnocení optických metod na rozpoznání přítomnost R-materiálu

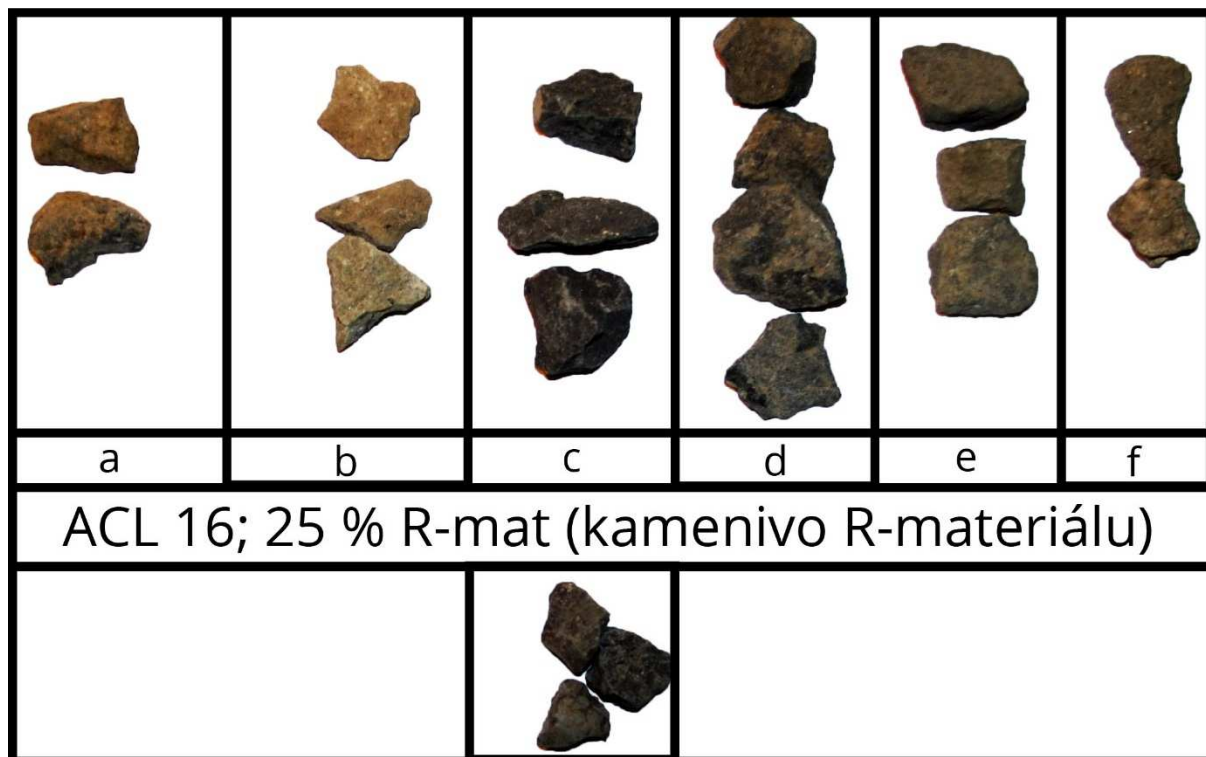
### 6.4.1. Metoda geologické analýzy

Touto metodou byly zkoušeny asfaltové směsi obsahující R-materiál, respektive směsi ACL 16; 25 % R-mat, ACO 11; 50 % R-mat a ACP 16+; 40 % R-mat.

Principem metody bylo optické zhodnocení vzorku kameniv po extrakci pojiva za účelem diagnostiky rozdílných geologií kameniva a predikce přítomnosti R-materiálu.

#### 6.4.1.1 ACL 16; 25 % R-mat

Kamenivo ACL 16; 25 % R-mat vykazovalo známky málo zastoupených typů kameniva různého geologického původu. Proto bylo roztrženo na málo zastoupené kamenivo v asfaltu s výrazně odlišnými geologickými typy (obr. 6.1) a kamenivo velmi často zastoupené v asfaltu (vždy jeden geologický typ – viz obr. 6.2).



Obr. 6.1 Vzorky rozdílného geologického typu kameniva asfaltové směsi ACL 16; 25 % R-mat (R-materiál)



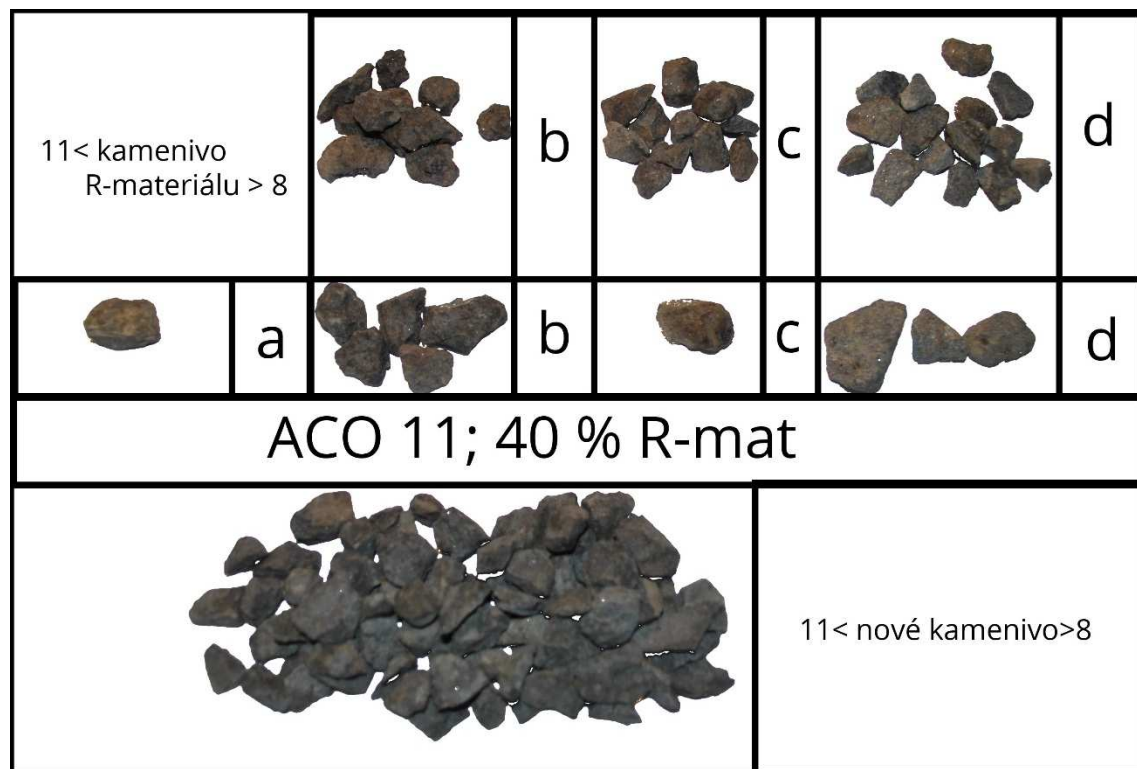


*Obr 6.2 Vzorky nejčastěji zastoupeného kameniva ACL 16; 25 % R-mat (nové kamenivo)*

Dominantní zastoupení zde mělo kamenivo jednoho geologického původu. To odpovídá předpokladům směsi s nízkým obsahem R-materiálu (obr. 6.2).

### 6.4.1.2 ACO 11; 50 % R-mat

Kamenivo této směsi vykazovalo typy kameniva různého geologického původu. Převažuje zde opět kamenivo jednoho geologického původu. Pro přehlednost byly různé geologické typy zváženy a srovnání množství R-materiálu ve směsi přibližně odpovídalo výrobcem deklarovanému množství (obr. 6.3).



Obr 6.3 Vzorčky kameniva směsi ACO 11 ;50 % R-mat

#### 6.4.1.3 ACP 16+; 40 % R-mat

Tento vzorek nevykazoval žádné geologické rozdíly v kamenivu (Obr. 6.4). V R-materiálu bylo pravděpodobně použito kamenivo stejného původu, jako má kamenivo do asfaltové směsi nově přidávané. To v tomto případě znemožňuje tuto metodu použít, pro určení R-materiálu v asfaltové směsi ACP 16+; 40 % R-mat.



*Obr. 6.4 Vzorky kameniva směsi ACP 16+; 40 % R-mat*

Pro potvrzení obsahu R-materiálu v asfaltové směsi je sice možné metodu geologické analýzy zrn kameniva použít, ale má svá omezení. Tento postup je problematický právě v případě, že kamenivo použité v R-materiálu má stejný geologický původ jako kamenivo do směsi přidávané.



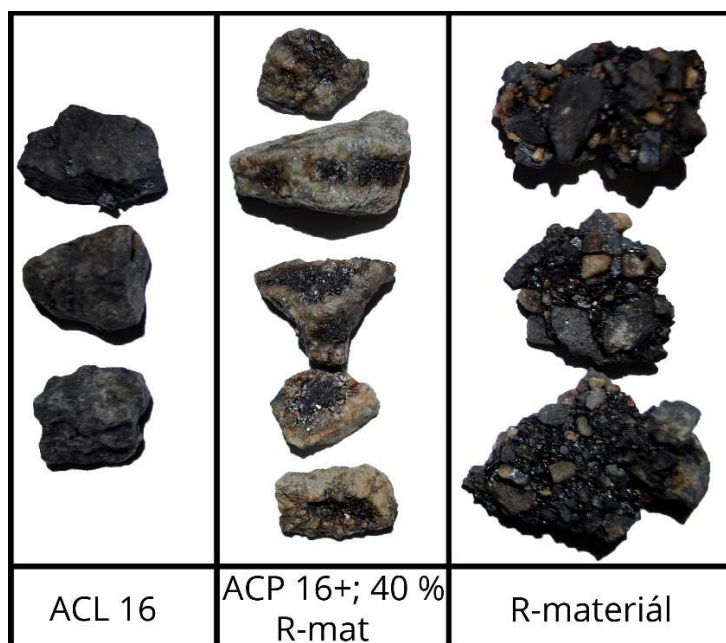
### 6.4.2. Metoda černé skály

Tato metoda je velmi nenáročná. Kamenivo vhodné pro účely této zkoušky vzniká při každé extrakci pojiva. Úplné očištění kameniva od zbytků černé skály vyžaduje velkou trpělivost. Nepatrné zbytky proto většinou na kamenivu zůstávají a dávají nám předběžnou informaci o přítomnosti R-materiálu ve směsi.

Pro interpretaci zbytků černé skály na kamenivu jsem zvolil směsi ACL 16, ACP 16+; 40 % R-mat a R-mat. Na následujícím obrázku (obr. 6.5) je možné vidět srovnání těchto směsí a na dalším obrázku (obr. 6.6) detail vybraných referenčních vzorků kameniva opět ze stejných směsí.



Obr. 6.5 Přítomnost černé skály na očištěném kamenivu zleva ACL 16, ACP 16+; 40 % R-mat a R-mat



Obr. 6.6 Přítomnost černé skály na očištěném kamenivu zleva ACL 16, ACP 16+; 40 % R-mat a R-mat

Tato metoda je velice jednoduchá a může snadno vypovídat o přítomnosti R-materiálu v asfaltové směsi

### 6.4.3. Shrnutí

Obě optické metody dokáží odhalit přítomnost R-materiálu. Metody jdou také kombinovat. Díky této kombinaci lze hrubě odhadnout přítomnost (a do jisté míry i množství) R-materiálu ve směsi.

Metoda geologické analýzy je ale velmi pracná a časově náročná. Předpokládá alespoň základní znalosti geologie. Z těchto důvodů bych metodu geologické analýzy používal pouze jako doplňkovou.

Metoda černé skály je naopak velmi jednoduchá. Vzorek pro určení přítomnosti R-materiálu vzniká jako vedlejší produkt při extrakci pojiva. Tuto metodu shledávám jako velmi průkaznou. Je vhodná jako doplňková metoda určení přítomnosti R-materiálu v asfaltové směsi.

## 6.5. Vyhodnocení metody postupné extrakce

Dostáváme se k hlavní části diplomové práce, proto jí věnujeme samostatnou kapitolu. Vyhodnoceny jsou zde výsledky tří postupných extrakcí ze vzorků směsi ACL 16, ACL 16; 25 % R-mat a R-materiál. Předpokladem je srovnání postupné extrakce na čisté směsi ACL 16 a R-materiálu. Směs obsahující oba tyto komponenty, tedy ACL 16; 25 % R-mat, bude představovat korelaci mezi těmito vzorky.

Pro vyhodnocení byly zvoleny zkoušky popsané v předešlých kapitolách (viz kapitola 4.9, 4.10, 4.11 a 4.12.), jejichž výsledky byly vzájemně srovnávány a posuzovány na vhodnost predikce přítomnosti R-materiálu v asfaltových směsích.

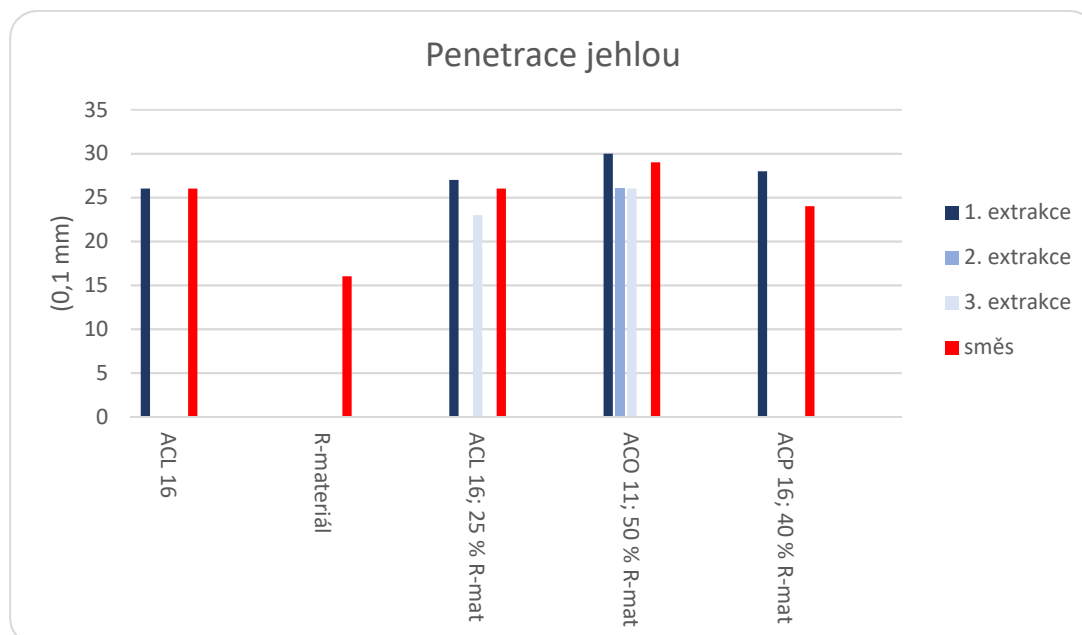
U vzorků asfaltových směsí se předpokládá, že vrstevnaté struktury pojiva vytvářejí film okolo kameniva. Tyto vrstevnaté struktury se budou zásadně lišit v reologických vlastnostech, pokud budou (či nebudou) obsahovat R-materiál. Toto tvrzení bude podloženo výsledky hodnocenými v této kapitole.

### 6.5.1. Vyhodnocení penetrace jehlou podle ČSN EN 1426

V této kapitole jsou uvedeny výsledky zkoušky penetrace jehlou na pojivech získaných z jednotlivých postupných extrakcí. U některých extrakcí nebylo po zpětném znovuzískání pojiva získáno dostatečné množství pojiva na stanovení penetrace. Výsledky jsou zobrazeny v tabulce 6.7 a grafu 6.13.

Penetrace (0,1 mm)				
	1 extrakce	2 extrakce	3 extrakce	Vzorek
ACL 16	26	-	-	26
R-materiál	-	-	-	16
ACL 16; 25 % R-mat	27	-	23	26
ACO 11; 50 % R-mat	30	26	26	29
ACP 16; 40% R-mat	28	-	-	24

Tab. 6.7 Penetrace jehlou postupné extrakce a směsí referenčních vzorků



Graf 6.13 Penetrace jehlou postupné extrakce a směsí referenčních vzorků

Z důvodu nedostatku dat interpretuji zkoušku penetrace jehlou na vzorku ACO 11; 50 % R-mat. Z naměřených dat je zřejmý výrazný rozdíl mezi první a druhou extrakcí. Výsledná směs vykazuje mírně sníženou penetraci oproti první extrakci. Výsledek aplikace výpočtového modelu podle vzorce (9) je uveden v (tab. 6.8)

	Výpočet	Přítomnost R-materiálu
ACO 11; 50 % R-mat	$30 - 26 = 4$	ANO

Tab. 6.8 Posouzení přítomnosti R-materiálu v asfaltové směsi podle výsledků penetrace jehlou

Z výrazného rozdílu penetrace u postupných extrakcí je patrná vrstevnatost struktury, a tedy přítomnost R-materiálu.

Metodou postupné extrakce vyhodnocené pomocí zkoušky penetrace jehlou jsme schopni predikovat přítomnost R-materiálu.

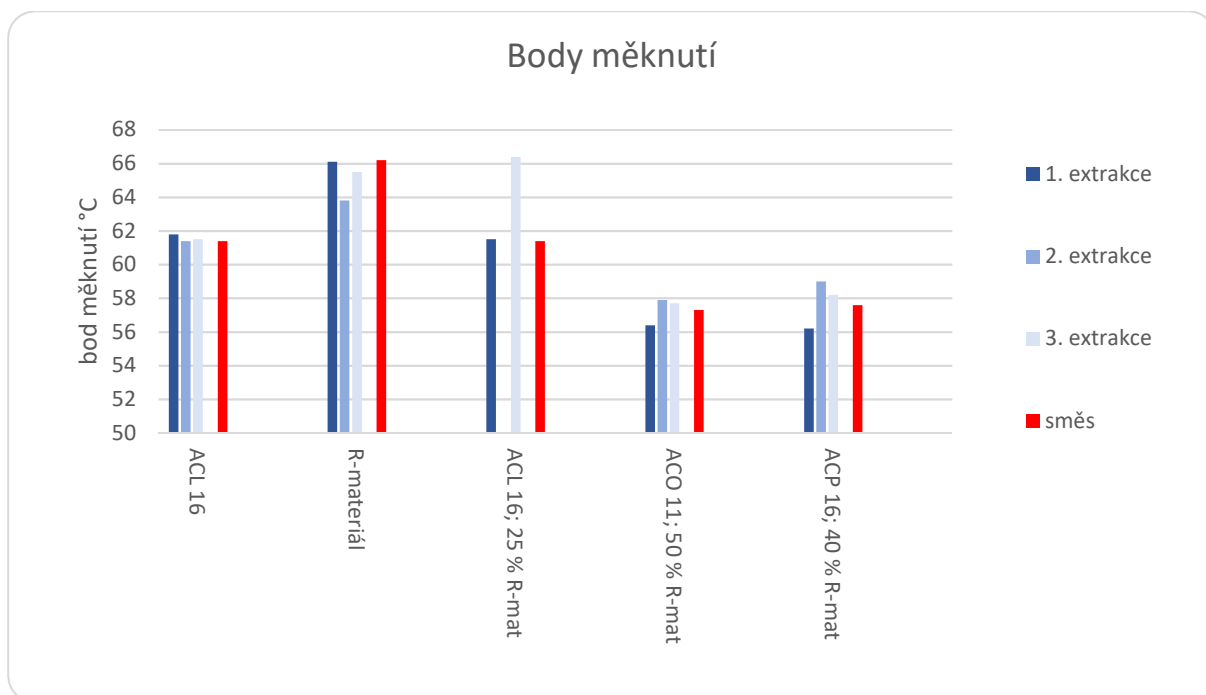
Na základě výsledků bodů měknutí u pojiva asfaltové směsi ACL 16 (viz kapitola 6.5.2) předpokládáme velmi podobné výsledky měření penetrace postupných extrakcí a referenční směsi. Toto tvrzení je třeba ověřit dodatečným měřením penetrace směsi ACL 16.

## 6.5.2. Vyhodnocení bodu měknutí podle ČSN EN 1427

V této kapitole se budeme zabývat srovnáním výsledků bodů měknutí pojiv postupných extrakcí a směsí referenčních vzorků. Výsledky jsou shrnuty v tabulce 6.9 a grafu 6.14. U asfaltové směsi ACL 16; 25 % R-mat nebylo při druhé extrakci získáno dostatečné množství pojiva pro stanovení bodu měknutí.

Bod měknutí (°C)				
	1 extrakce	2 extrakce	3 extrakce	Směs
ACL 16	61,8	61,4	61,5	61,4
R-materiál	66,1	63,8	65,5	66,2
ACL 16; 25 % R-mat	61,5		66,4	61,4
ACO 11; 50 % R-mat	56,4	57,9	57,7	57,3
ACP 16; 40% R-mat	56,2	59	58,2	57,6

Tab. 6.9 Body měknutí postupné extrakce a směsi referenčních vzorků



Graf 6.14 Body měknutí postupné extrakce a směsi referenčních vzorků

Z naměřených vlastností pojiva asfaltové směsi ACL 16 je patrné, že rozdíly mezi body měknutí jsou minimální. Z grafu můžeme vyčíst, že první extrakce vykazuje mírné zvýšení tvrdosti. To může být způsobeno oxidačními změnami při výrobě a naznačením počínajícího vzniku vrstevnaté struktury. Bodu měknutí pojiva získaného z druhé extrakce odpovídá bod měknutí celkové směsi. Rozdíly mezi body měknutí jsou však na měřenou metodu příliš malé, mezní chybovost (rozdíl teplot mezi měřenými kroužky) se toleruje do 1 °C.



Z naměřených vlastností pojiva směsi R-materiálu upozorňujeme na rozdíl bodů měknutí pojiv získaných z jednotlivých extrakcí a vzorku R-materiálu. Výsledné hodnoty ukazují výraznou tvrdost R-materiálu.

Naměřené vlastnosti pojiva směsí obsahujících R-materiál ukazují, že tvrdost druhé a třetí extrakce je výrazně vyšší. To nám potvrzuje přítomnost vrstevnaté struktury, a tedy i přítomnost R-materiálu.

Výsledky bodů měknutí vztažené k výpočtovému modelu (10) určenému pro predikci přítomnosti R-materiálu v asfaltových směsích jsou shrnuty v (Tab. 6.10).

	Výpočet	Přítomnost R-materiálu
ACL 16	$61,8 - 61,4 = 0,4$	NE
R-materiál	$66,1 - 63,8 = 2,3$	ANO
ACO 11; 50 % R-mat	$57,9 - 56,4 = 1,5$	ANO
ACP 16; 40% R-mat	$59 - 56,2 = 2,8$	ANO

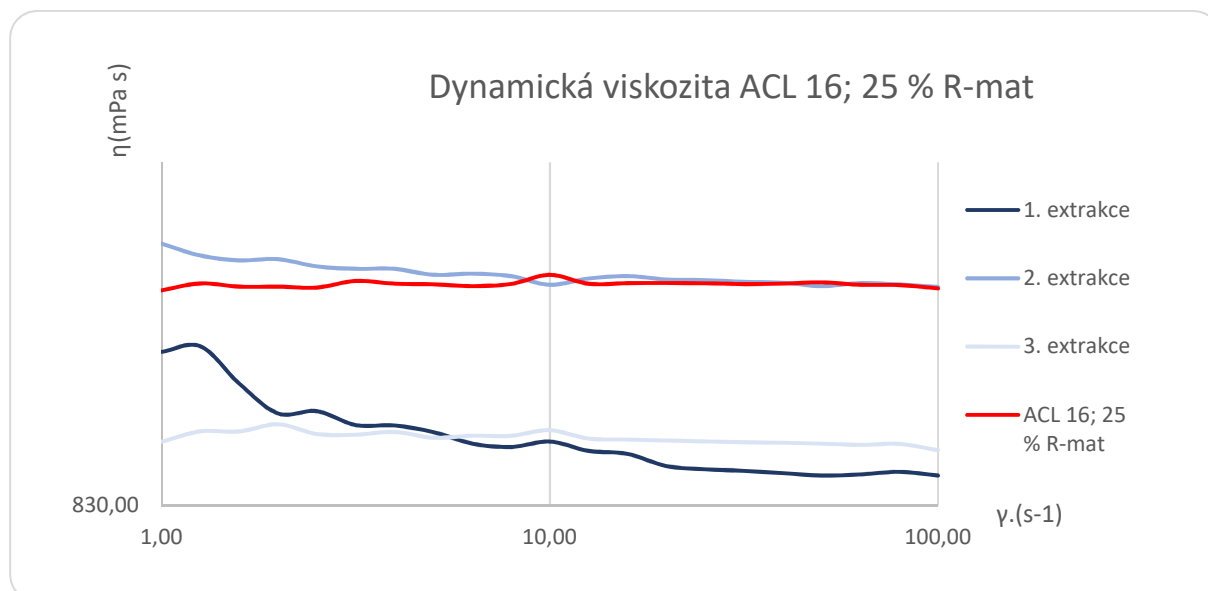
Tab. 6.10 Posouzení přítomnosti R-materiálu v asfaltové směsi podle výsledků bodů měknutí

Z vyhodnocených dat vyplývá rozdíl ve změně bodů měknutí postupných extrakcí, po přidání R-materiálu do asfaltové směsi. Metodu postupné extrakce vyhodnocenou bodem měknutí považují za vhodnou pro predikci přítomnosti R-materiálu.

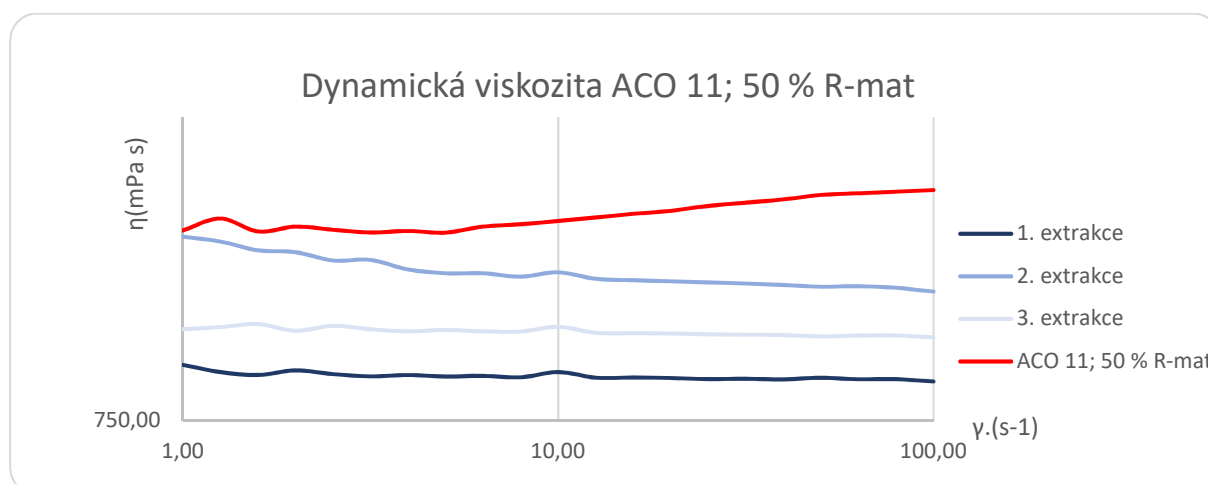
### 6.5.3. Vyhodnocení dynamické viskozity pomocí DSR podle ČSN EN 13702

Bohužel měření dynamické viskozity nebylo z časových důvodů měřeno v potřebném rozsahu pro komplexní vysvětlení chování asfaltového pojiva ve vrstevnaté struktuře. Tím pádem nebyly měřeny asfaltové směsi ACL 16, ACP 11+; 50 % R-mat a R-materiál, nýbrž směsi použité při extrakci.

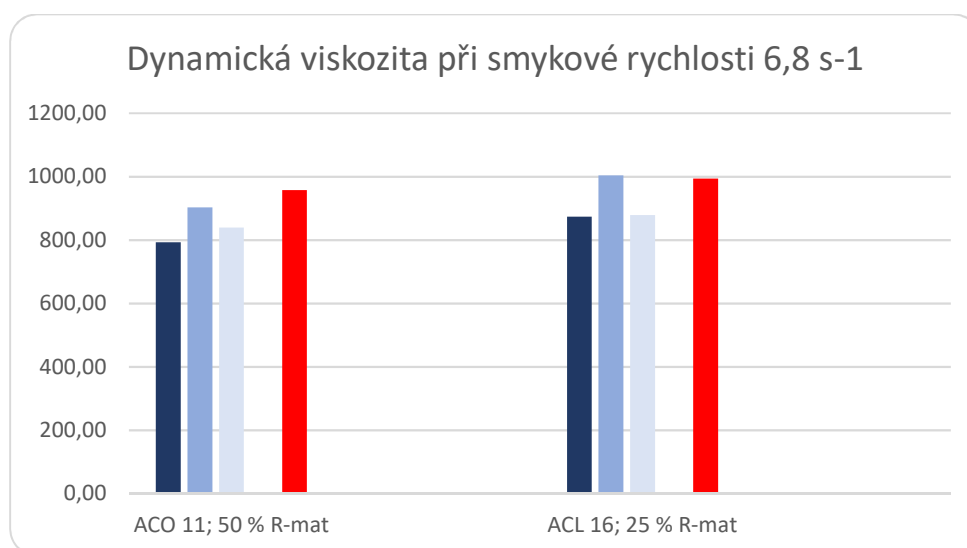
V této kapitole budou zobrazeny výsledky měření dynamické viskozity postupných extrakcí a směsí vzorků ACL 16; 25 % R-mat (graf 6.15 a 6.17) a ACO 11; 50 % R-mat (graf 6.16 a 6.17).



Graf 6.15 Dynamické viskozity postupné extrakce ACL 16; 25 % R-mat a směsi ACL 16; 25 % R-mat



Graf 6.16 Dynamické viskozity postupné extrakce ACL 16; 25 % R-mat a směsi ACL 16; 25 % R-mat



Graf 6.17 Dynamické viskozity postupné extrakce a směsi referenčních vzorků při smykové rychlosti 6,8 s⁻¹

Zkouška dynamické viskozity potvrzuje velký rozdíl mezi první a druhou extrakcí. Zásadní je vliv vrstevnaté struktury, která zapříčiňuje markantní rozdíl mezi extrakcemi.

Viskozita pojiva znovuzískaného z výsledné směsi se pohybuje lehce pod viskozitou pojiva druhé extrakce, nebo nejvyšší dosaženou dynamickou viskozitou všech vzorků. Tento fakt předpokládá výraznou spoluúčast pojiva R-materiálu na výsledné dynamické viskozitě asfaltového pojiva.

Ve srovnání s výsledky postupné extrakce ale směs nemůže vykazovat vyšší dynamickou viskozitu než některá z vrstev. Tento stav pak znehodnocuje naměřená data. Z tohoto důvodu doporučuji měření dynamické viskozity opakovat a blíže se jím zabývat.

Výsledky postupných extrakcí splňují předpoklady vrstevnaté struktury asfaltových směsí obsahujících R-materiál. Druhá extrakce je výrazně tvrdší než ostatní.

Měření dynamické viskozity jednoduše nepovažuji za vhodné pro predikci přítomnosti R-materiálu ve směších.

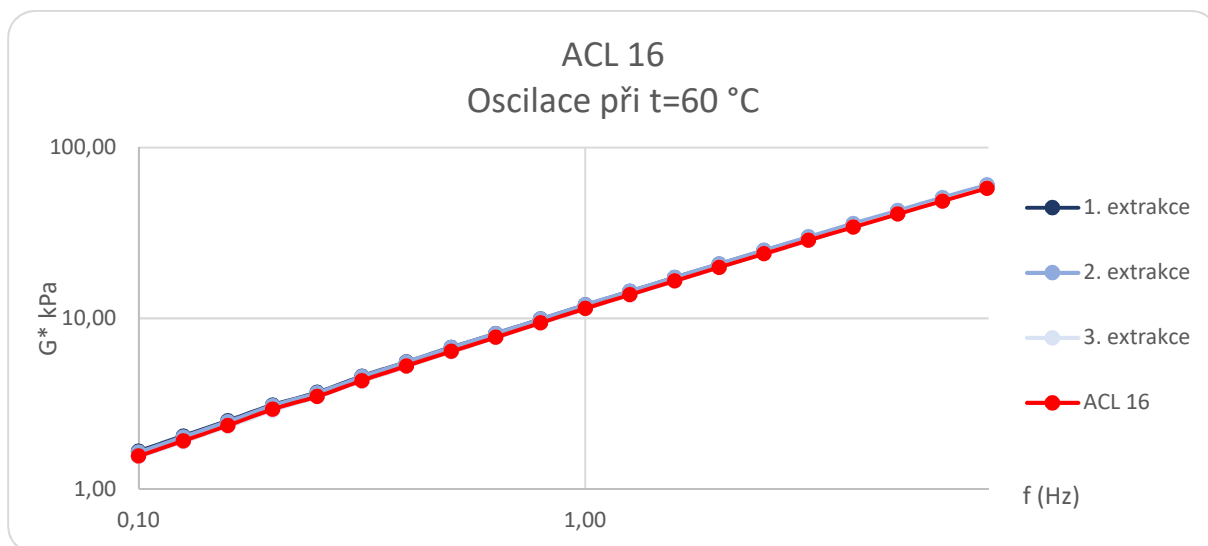
#### **6.5.4. Vyhodnocení komplexního smykového modulu a fázového úhlu v DSR podle ČSN EN 14770**

Zkouška zobrazuje výsledky pojiv získaných z postupných extrakcí směsí a pojiva směsi referenčních vzorků.

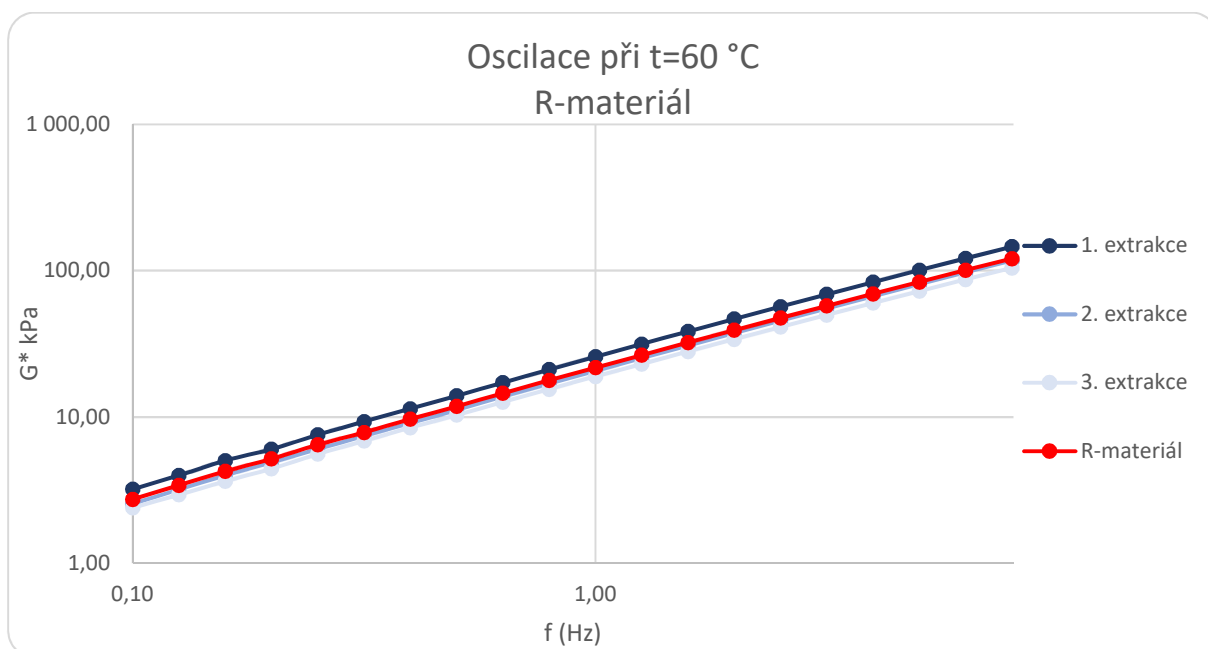
Z důvodu přehlednosti nebyla výsledná data většiny grafů zobrazujících referenční křivky jednotlivých vzorků spojována.

Grafy budou seřazeny do bloků, které definují jeden typ grafu pro všechny referenční vzorky v tomto pořadí: ACL 16, R-materiál, ACL 16; 25 % R-mat, ACO 11; 50 % R-mat a ACP 16; 40 % R-mat. Jedná se tedy o následující grafy:

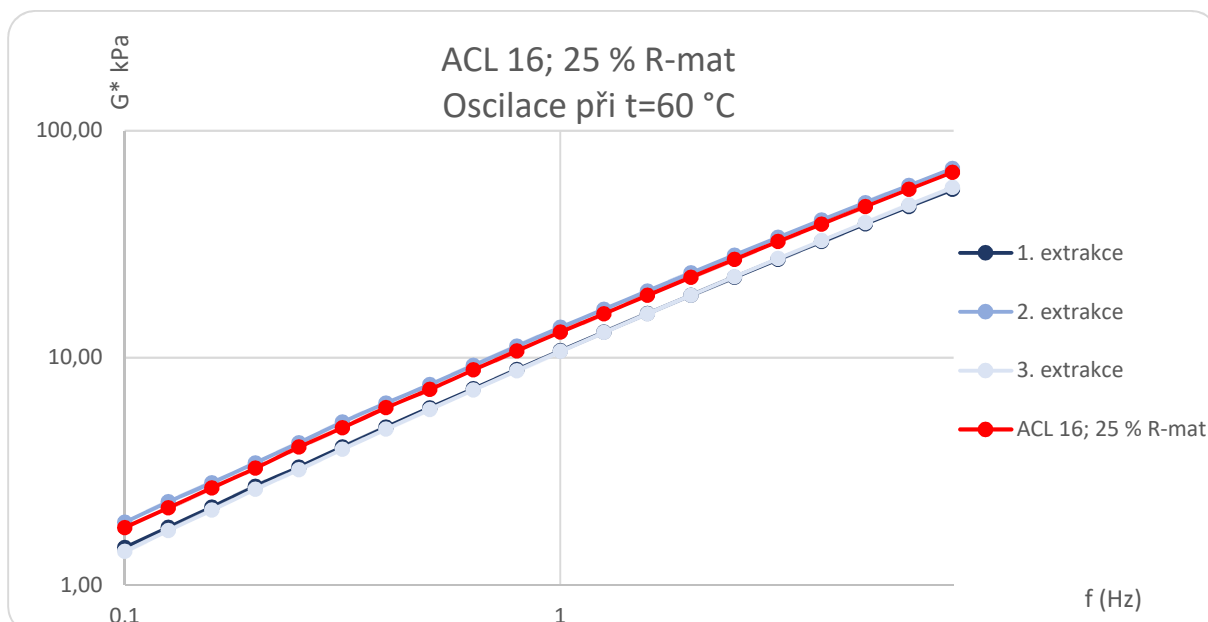
- grafy Oscilace při  $t = 60\text{ °C}$  referenčních vzorků (graf 6.18, 6.19, 6.20, 6.21 a 6.22),
- grafy Oscilace při  $f = 1,59\text{ Hz}$  referenčních vzorků (graf 6.23, 6.24, 6.25, 6.26 a 6.27),
- grafy Blackových diagramů referenčních vzorků (graf 6.28, 6.29, 6.30, 6.31 a 6.32),
- graf komplexních smykových modulů referenčních vzorků při  $t = 60\text{ °C}$  a  $f = 1,59\text{ Hz}$  (graf 6.33).



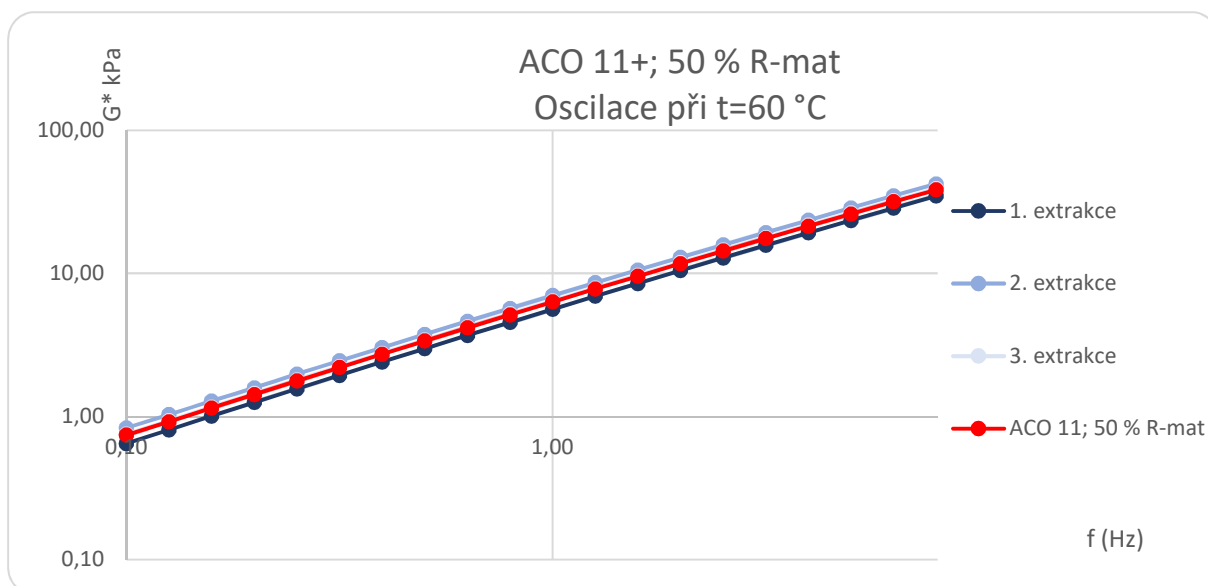
Graf 6.18 Komplexní smykové moduly postupné extrakce ACL 16 a směsi ACL 16



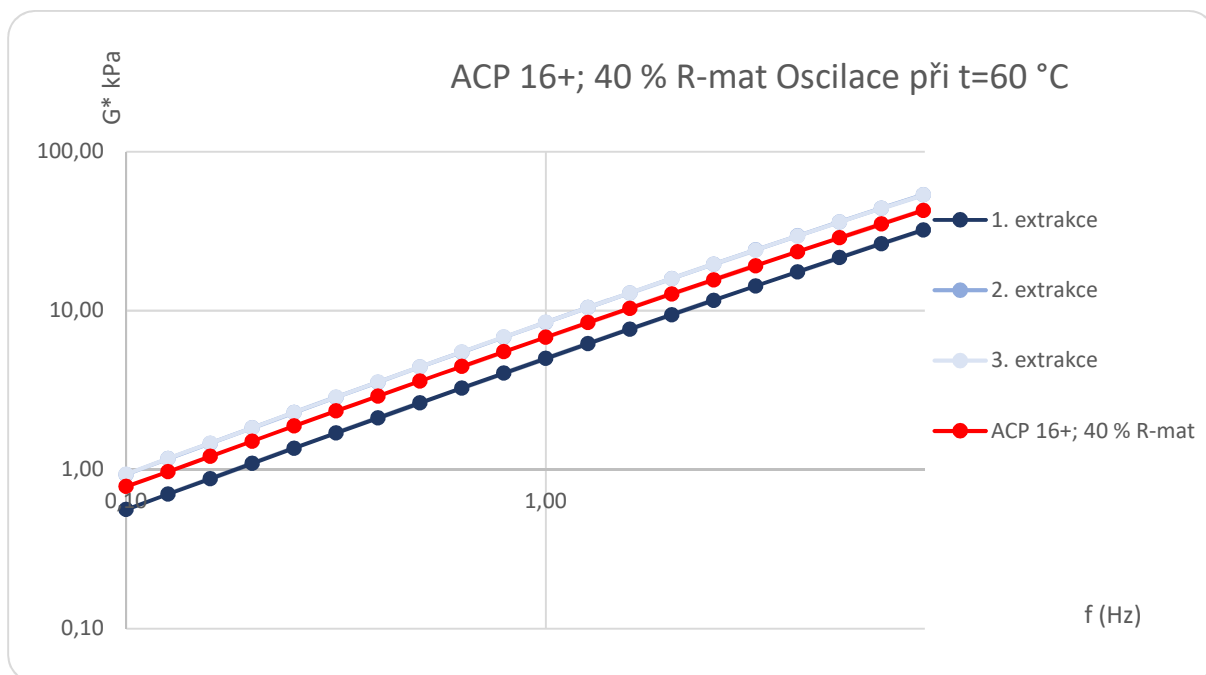
Graf 6.19 Komplexní smykové moduly postupné extrakce R-materiálu a vzorku R-materiálu



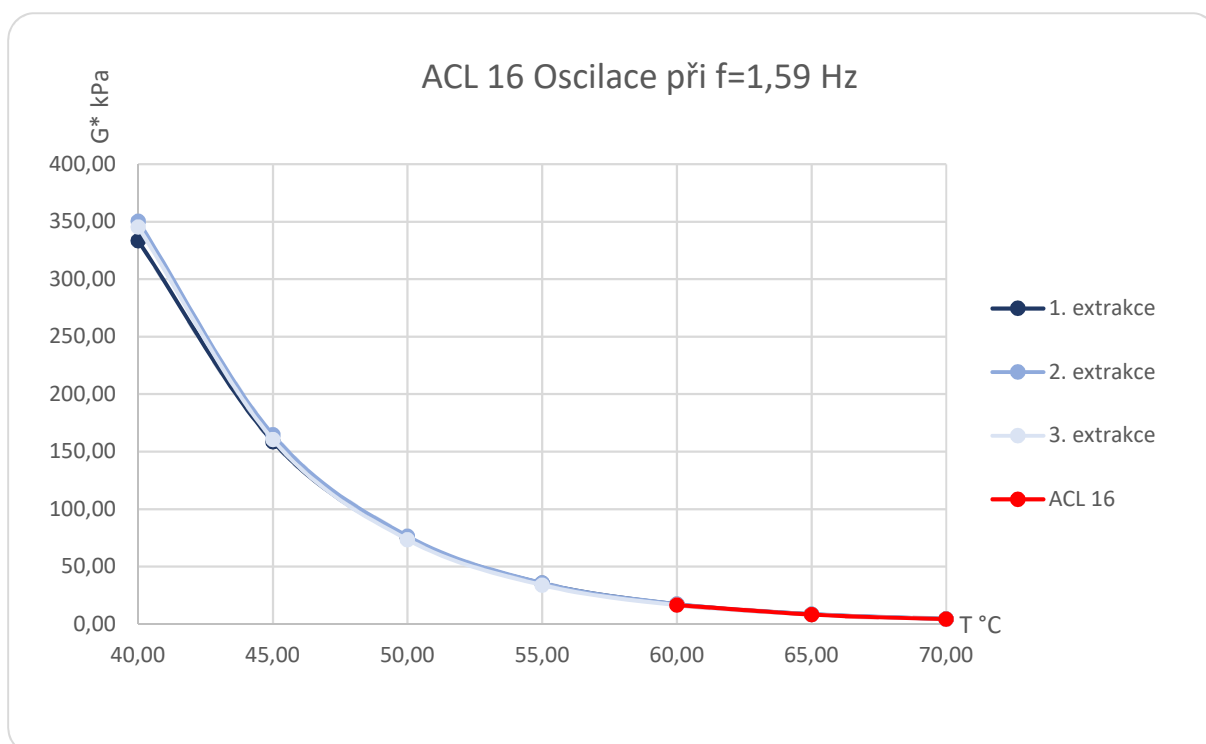
Graf 6.20 Komplexní smykové moduly postupné extrakce ACL 16; 25 % R-mat a směsi ACL 16; 25 % R-mat



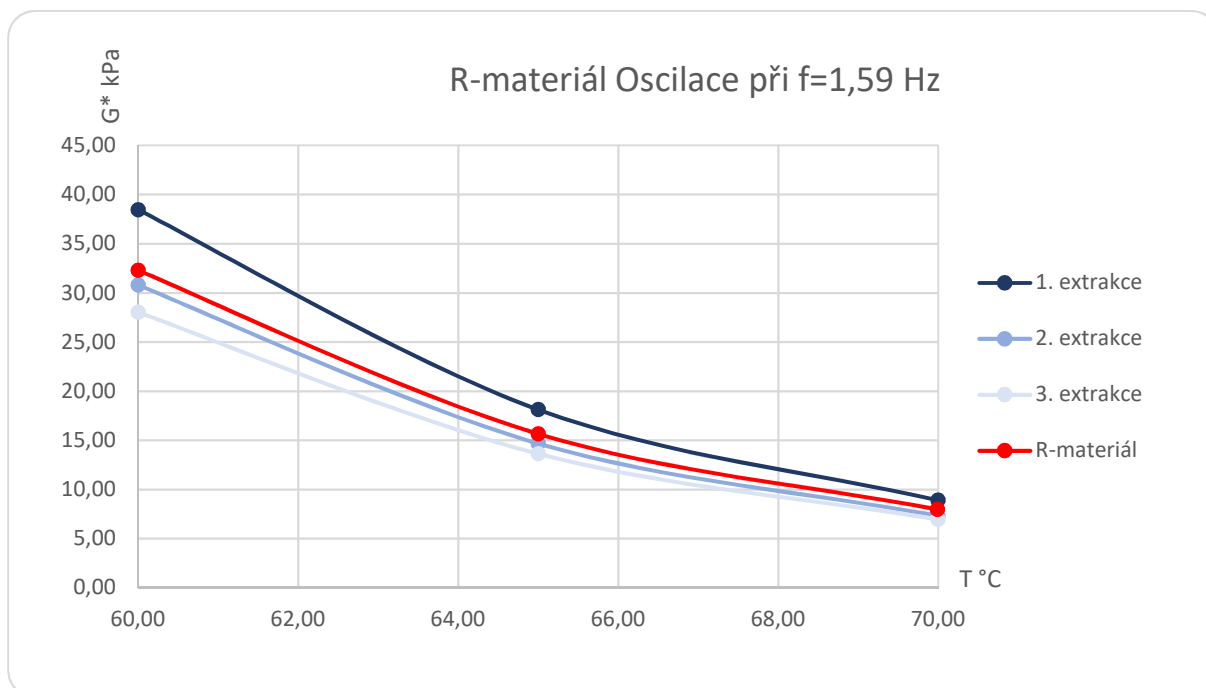
Graf 6.21 Komplexní smykové moduly postupné extrakce ACO 11; 50 % R-mat a směsi ACO 11; 50 % R-mat



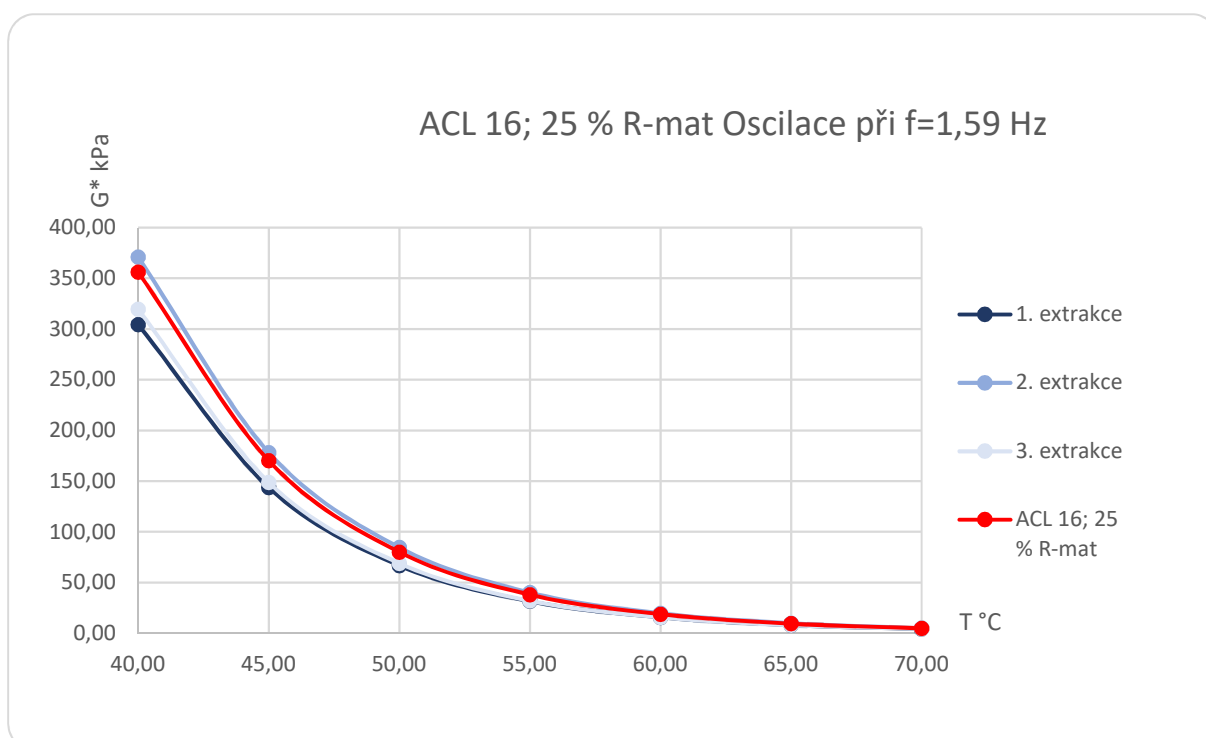
Graf 6.22 Komplexní smykové moduly postupné extrakce ACP 16+; 40 % R-mat a směsi ACP 16+; 40 % R-mat



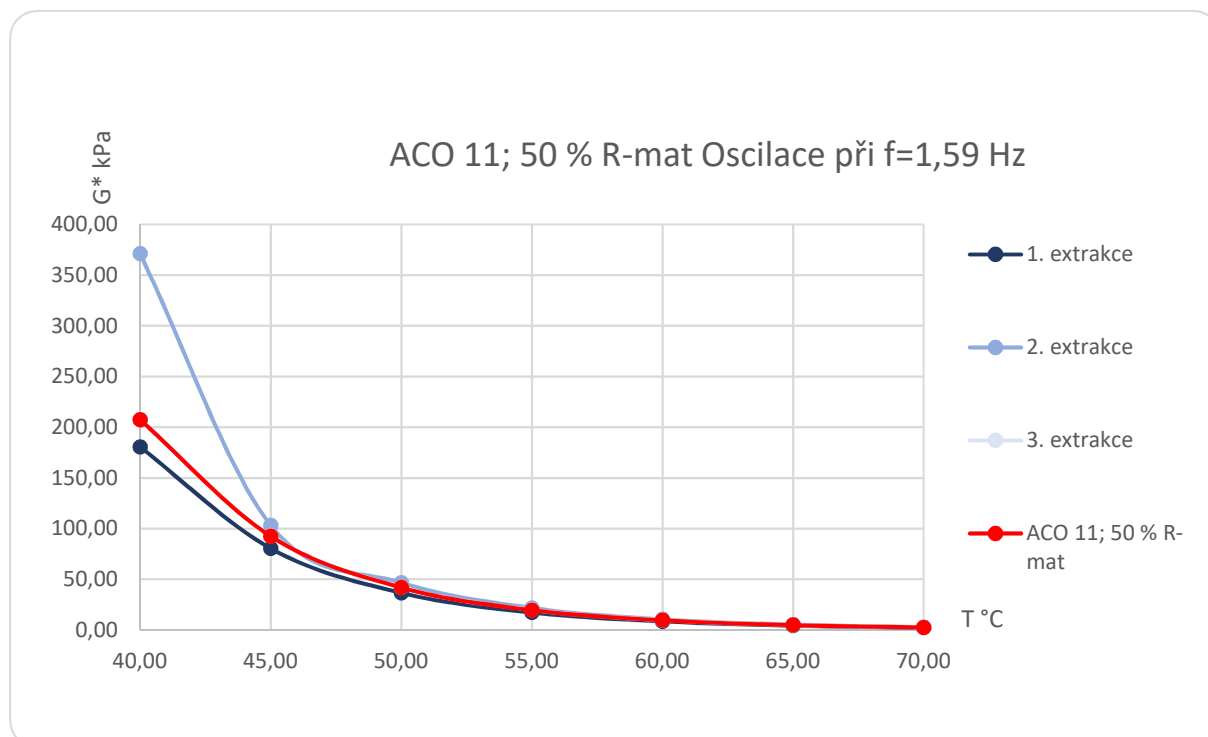
Graf 6.23 Komplexní smykové moduly postupné extrakce ACL 16 a směsi ACL 16 při  $f = 1,59\text{ Hz}$



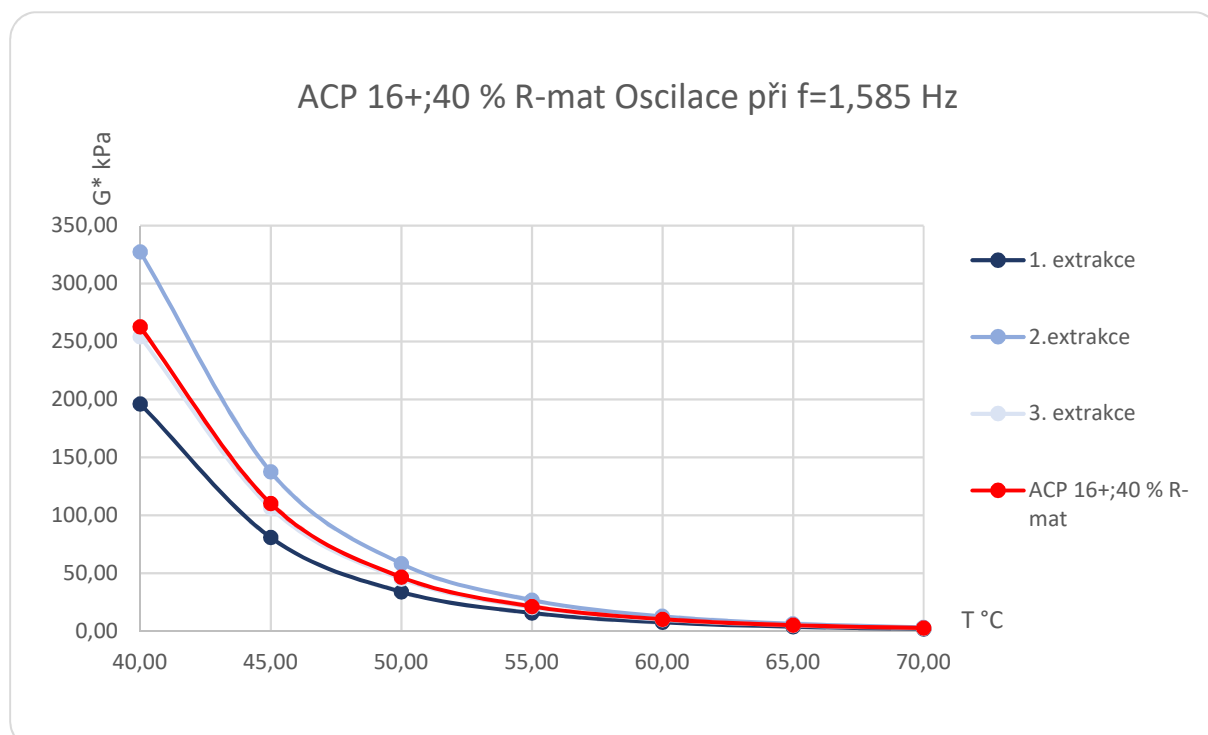
Graf 6.24 Komplexní smykové moduly postupné extrakce R-materiálu a vzorku R-materiálu při  $f = 1,59$  Hz



Graf 6.25 Komplexní smykové moduly postupné extrakce ACL 16; 25 % R-mat a směsi ACL 16; 25 % R-mat při  $f = 1,59$  Hz

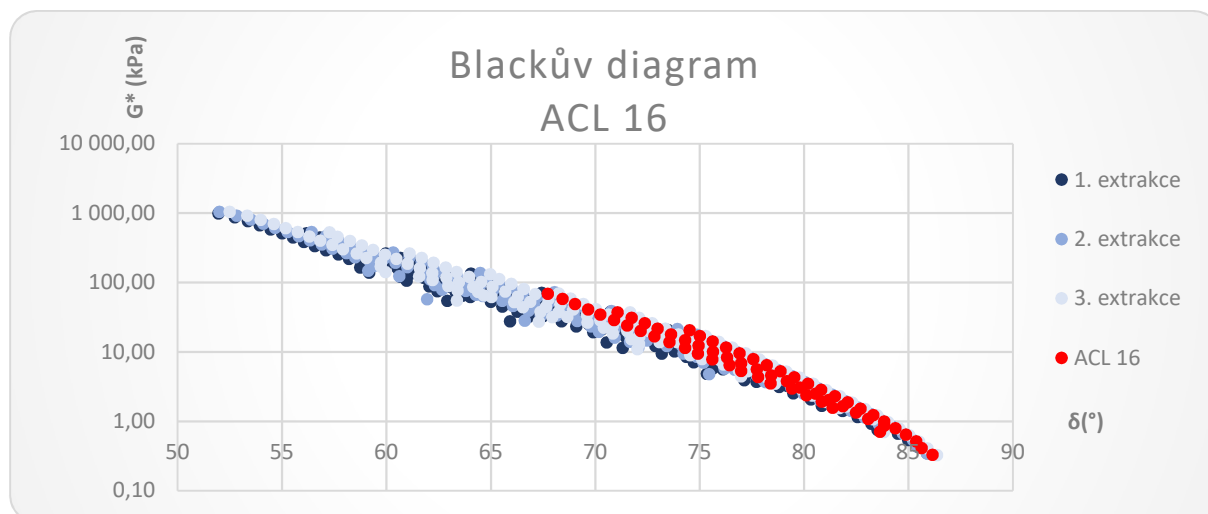


Graf 6.26 Komplexní smykové moduly postupné extrakce ACO 11; 50 % R-mat a směsi ACO 11; 50 % R-mat při  $f = 1,59$  Hz

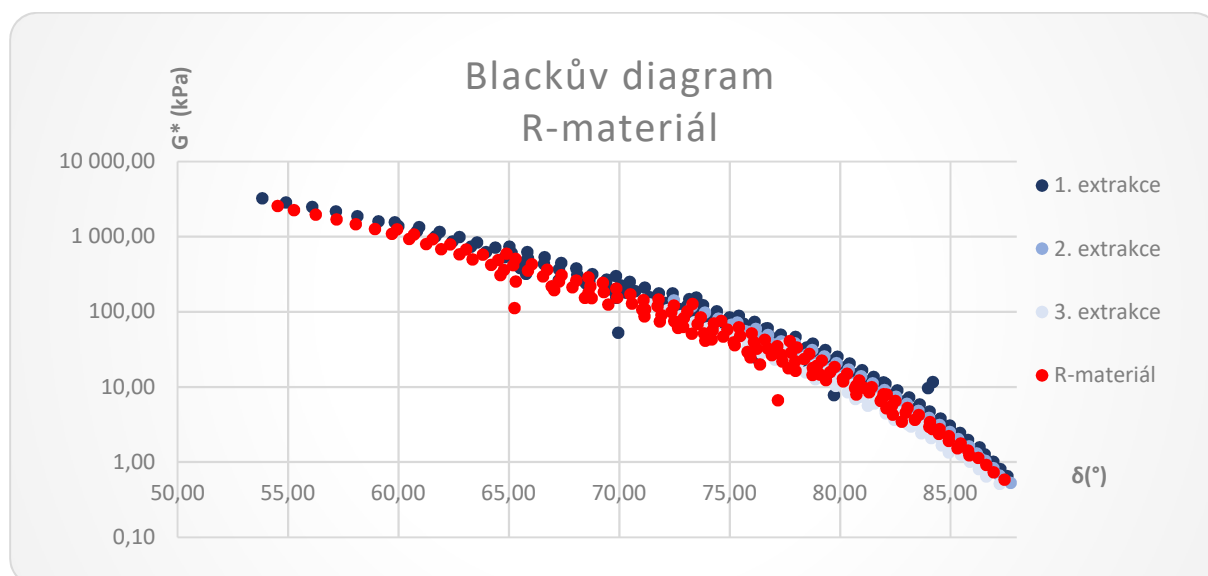


Graf 6.27 Komplexní smykové moduly postupné extrakce ACP 16+; 40 % R-mat a směsi ACP 16+; 40 % R-mat při  $f = 1,59$  Hz

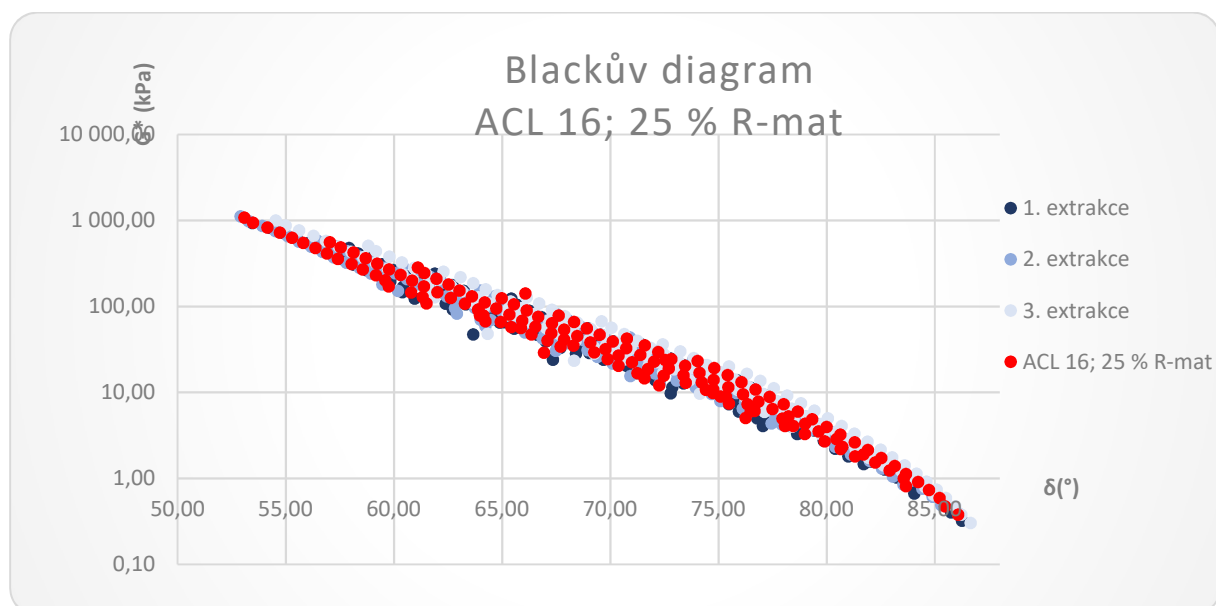




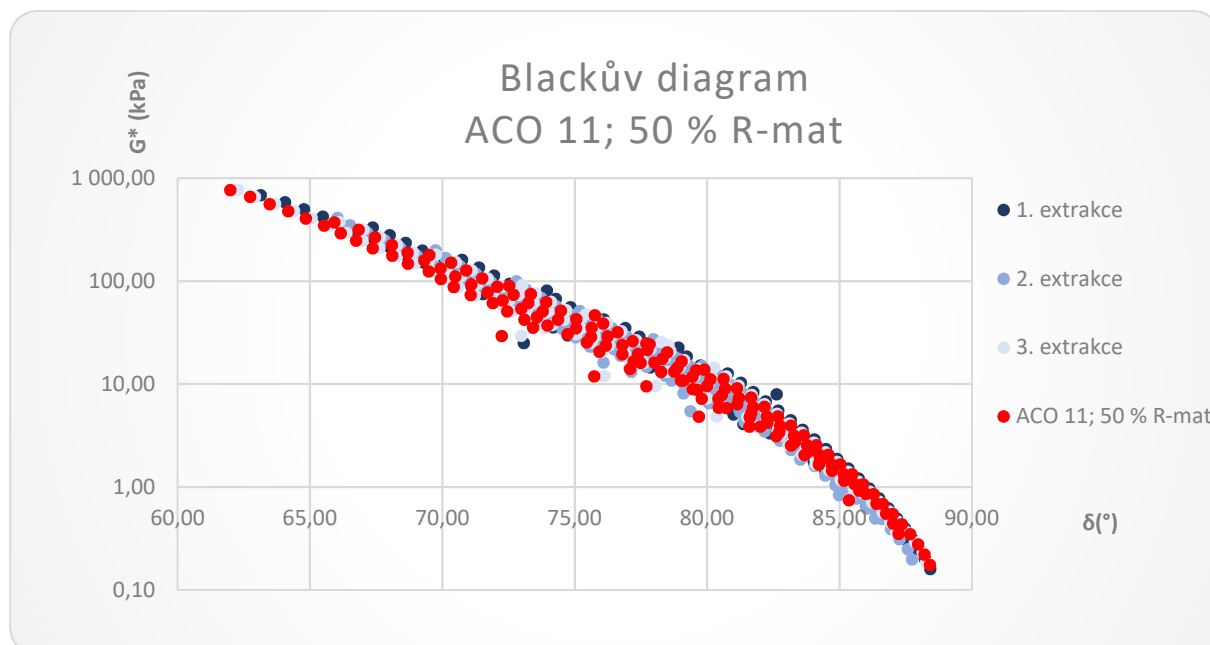
Graf 6.28 Blackův diagram postupné extrakce ACL 16 a směsi ACL 16



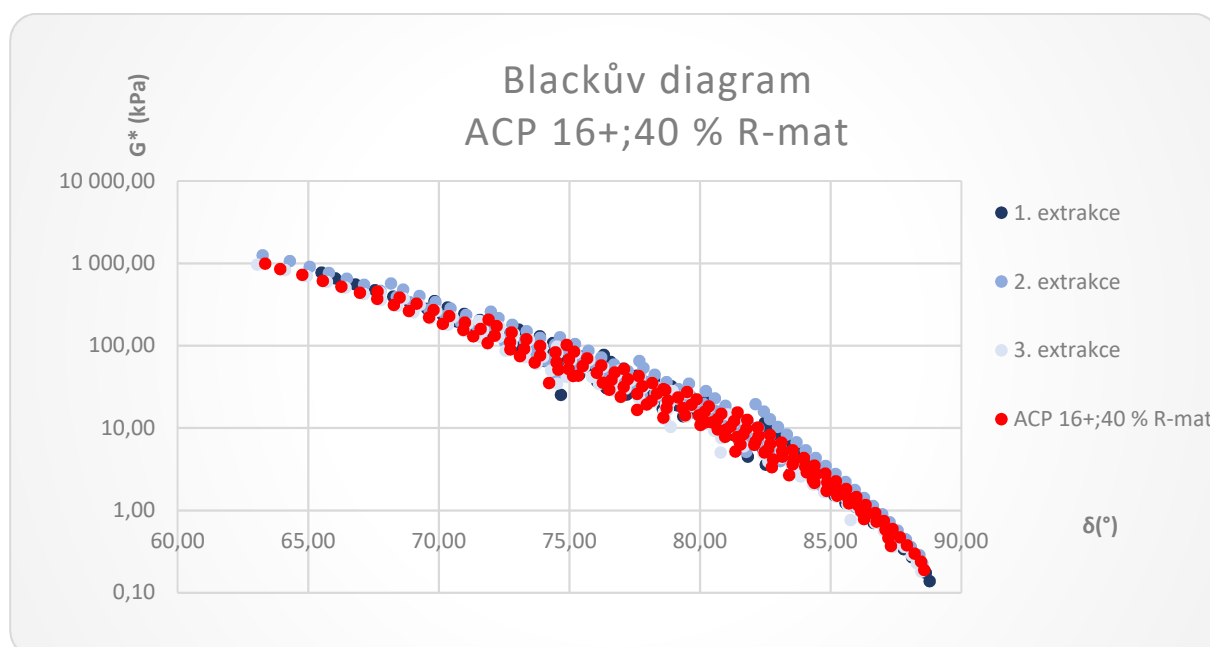
Graf 6.29 Blackův diagram postupné extrakce R-materiálu a vzorku R-materiálu



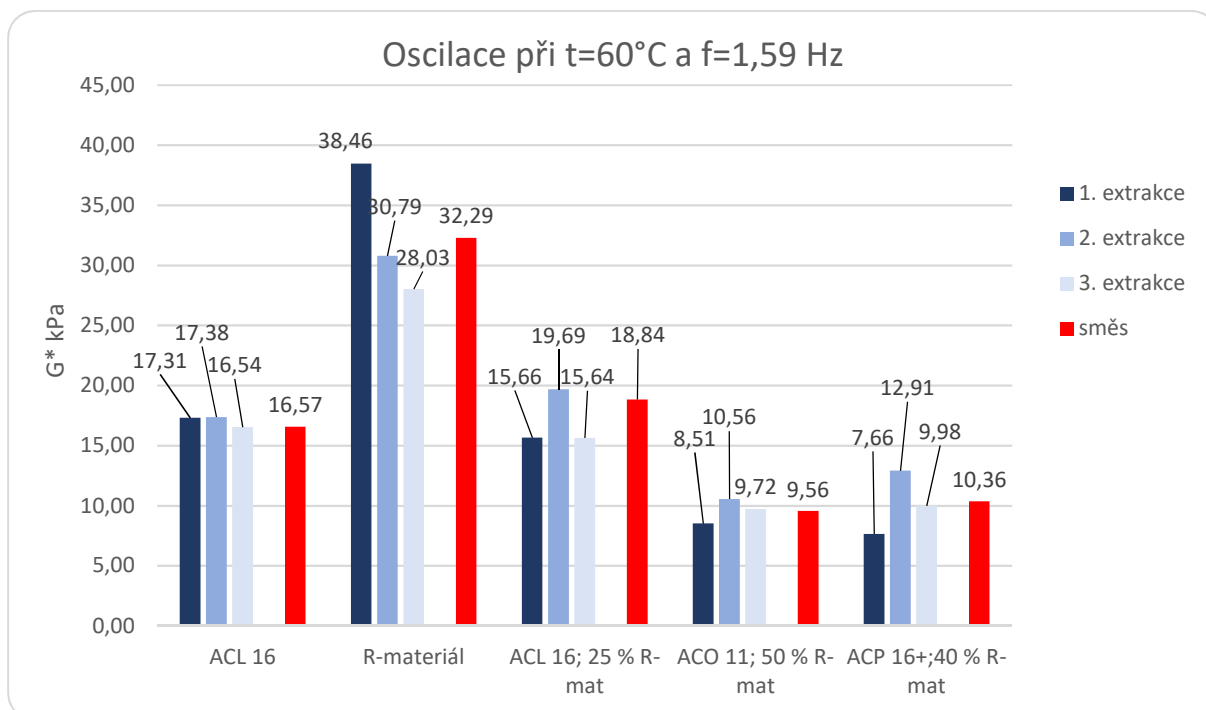
Graf 6.30 Blackův diagram postupné extrakce ACL 16; 25 % R-mat a směsi ACL 16; 25 % R-mat



Graf 6.31 Blackův diagram postupné extrakce ACO 11; 50 % R-mat a směsi ACO 11; 50 % R-mat



Graf 6.32 Blackův diagram postupné extrakce ACP 16+;40 % R-mat a směsi ACP 16+;40 % R-mat



Graf 6.33 Komplexních smykové moduly postupné extrakce a směsi referenčních vzorků při  $t = 60^{\circ}\text{C}$  a  $f = 1,59\text{ Hz}$

Výsledky komplexních smykových modulů pojiva asfaltové směsi ACL 16 získané z první a druhé extrakce vykazují nepatrné rozdíly v hodnotách komplexního smykového modulu. Z toho lze vyvodit stejné vlastnosti pojiva a přítomnost jiné vrstevnaté struktury (viz kapitola). Třetí extrakce a výsledná směs vykazují rovněž velmi podobné výsledky. Blackův diagram říká, že pojiva mají jen velmi nepatrné rozdíly ve funkčních vlastnostech.

Rozdíly komplexních smykových modulů pojiv získaných z postupných extrakcí jsou nepatrné a rovněž komplexní smykový modul pojiva vyextrahovaného ze směsi ACL 16 je s těmito výsledky srovnatelný. Rozdíl extrémů komplexních smykových modulů nepřesahuje hodnotu 1 kPa.

Výsledky komplexních smykových modulů pojiva R-materiálu ukazují znatelné rozdíly komplexního smykového modulu u různých extrakcí. Tento fakt se musí výrazně projevit při přimísení R-materiálu do asfaltové směsi. Rozdíl extrémů komplexních smykových modulů zde činí více než 10 kPa.

Z výsledků komplexních smykových modulů pojiva asfaltových směsí s přítomností R-materiálu vyplývá výrazný rozdíl mezi první a druhou extrakcí. Naměřená data také vykazují velký rozdíl maximálních a minimálních hodnot komplexního smykového modulu. Tento jev prozrazuje vrstevnatou strukturu směsi a přítomnost R-materiálu.

Naměřené hodnoty jsou vyhodnoceny s použitím výpočtového modelu (11) (tab. 6.11) a výpočtového modelu (12) (tab. 6.12)

	Výpočet	Přítomnost R-materiálu
ACL 16	16,57>17,31	NE
R-materiál	32,29>38,46	NE
ACL 16; 25 % R-mat	18,84>15,66	ANO
ACO 11; 50 % R-mat	9,56>8,51	ANO
ACP 16; 40% R-mat	10,36 > 7,66	ANO

Tab. 6.11 Posouzení přítomnosti R-materiálu v asfaltové směsi podle výsledků komplexního smykového modulu

Z výsledků je patrné, že naměřená data odpovídají výsledkům deklarovaných výrobcem. U směsi čisté a pouze R-materiálu podmínka nevyhoví. V tabulce 7.1 jsou uvedeny odhady obsahu R-materiálu v asfaltové směsi, které byly získány na základě výpočtového modelu vyvinutého v rámci této diplomové práce. Je patrné, že výpočtový model je schopen nejen odhadnout, zda je R-materiál v asfaltové směsi přítomen, ale taky velice přesně odhadnout dávkované množství R-materiálu v asfaltové směsi. Tento výsledek by ovšem bylo vhodné ověřit na větší škále asfaltových směsí.

	Výpočet	množství R-materiálu	Deklarované Množství R-materiálu
ACL 16; 25 %R-mat	$R_{mat} = \left(1 - \frac{18,84 - 15,66}{19,69 - 15,66}\right) * 100$	21,09 %	25 %
ACO 11; 50 % R-mat	$R_{mat} = \left(1 - \frac{9,56 - 8,51}{10,56 - 8,51}\right) * 100$	48,78 %	50 %
ACP 16; 40 % R-mat	$R_{mat} = \left(1 - \frac{10,36 - 7,66}{12,91 - 7,66}\right) * 100$	48,57 %	40 %

Tab. 6.12 Posouzení přibližného množství R-materiálu v asfaltové směsi podle výsledků komplexního smykového modulu

Vyhodnocení komplexních smykových modulů použitými matematickými metodami, považuji za nejpřesnější metodu predikce přítomnosti R-materiálu. Metodu považuji za vhodnou pro hrubý odhad přítomnosti R-materiálu v asfaltových směsích.

### 6.5.5. Shrnutí výsledků postupné extrakce

Postupná extrakce na asfaltové směsi ACL 16 prozrazuje velmi nepatrné rozdíly v hodnotách komplexních smykových modulů. Tento fakt je v souladu s tvrzením, že postupná extrakce je určena k identifikaci vrstevnaté struktury směsi. Strukturu této konkrétní směsi lze jen těžko rozpoznat. Vrstevnatá struktura zde sice existuje, ale má jiný charakter než u asfaltových směsí s R-materiálem (viz kapitola).

Pojivo obsažené v R-materiálu má výrazně elastičtější (tvrdší) vlastnosti než pojiva nová. Dále lze předpokládat výrazné rozdíly ve vlastnostech pojiva v R-materiálu způsobených vrstevnatou strukturou, která vznikla během oxidace pojiva v daném čase. Přidání R-materiálu do asfaltové směsi zásadně pozmění reologické vlastnosti výsledné směsi. Vyvozují z toho možnost tyto změny jednoduše identifikovat.

Důležitým zjištěním u tohoto typu měření je popření teorie rozdílné doby rozpouštění pojiva vlivem jeho tvrdosti. Teorie předpokládala, že měkká pojiva se budou rozpouštět snáze a dříve než pojiva tvrdá. Naše měření však dokazuje, že zásadní je pořadí, nikoliv tvrdost pojiva. Tento fakt umocňuje vhodnost metody postupné extrakce na identifikaci a odhad množství R-materiálu v asfaltových směsích opírající se o teorii vrstevnatých struktur popsanych v kapitole 3.5.

U všech zkoušek provedených na pojivech asfaltových směsí obsahujících R-materiál byl výrazně patrný rozdíl mezi první a druhou extrakcí. Tento fakt potvrzuje přítomnost vrstevnaté struktury směsi a dokazuje přítomnost R-materiálu ve směsi.

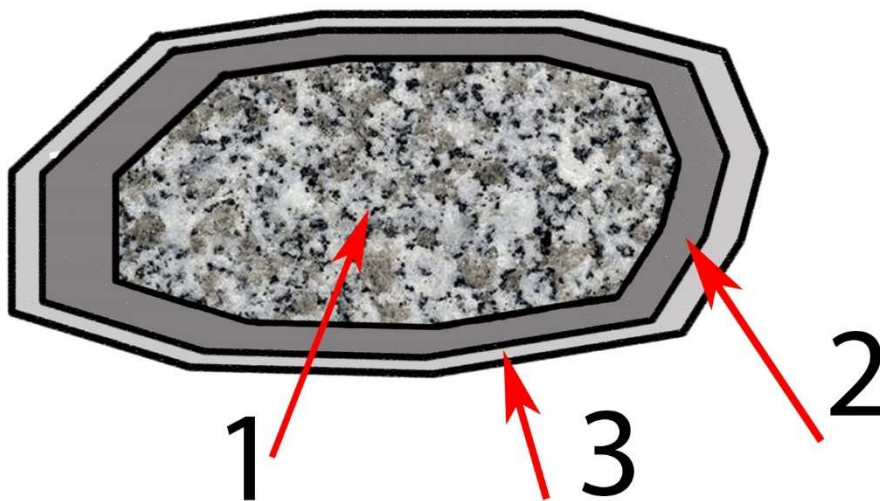
Metodu postupné extrakce vyhodnocenou komplexním smykovým modulem považují za nejprůkaznější a nejpřesnější ze všech ostatních výše uvedených metod.

## 6.6. Shrnutí metody postupné extrakce – diskuze

Z naměřených hodnot jednoznačně vyplývá, že postupná extrakce má velký potenciál v určení přítomnosti R-materiálu. K tomuto tvrzení mě vede průkaznost výsledků všech použitých zkoušek pojiv. Celá problematika vychází z pochopení vrstevnaté struktury směsi a černé skály. Pro úplné pochopení postupné extrakce budou podrobněji shrnuty poznatky o směsích bez R-materiálu, asfaltové směsi obsahující R-materiál a fázích postupné extrakce.

### 6.6.1. Asfaltová směs bez přidání R-materiálu

Při postupné extrakci je patrný vrstevnatý systém asfaltového pojiva obklopující kamenivo, které je ale jiného charakteru než u směsi s R-materiálem. Asfaltové pojivo vytvoří okolo kameniva dvě vrstvy. Svrchní vrstva je zachycena první a druhou extrakcí (velmi podobné vlastnosti), která vytváří vrstvu pojiva výrazně ovlivněnou výrobním procesem. Třetí vrstva je pojivo, které částečně chrání nově vzniklá vrstva s mírně měkčími charakteristikami, než má pojivo svrchní (obr. 6.7).

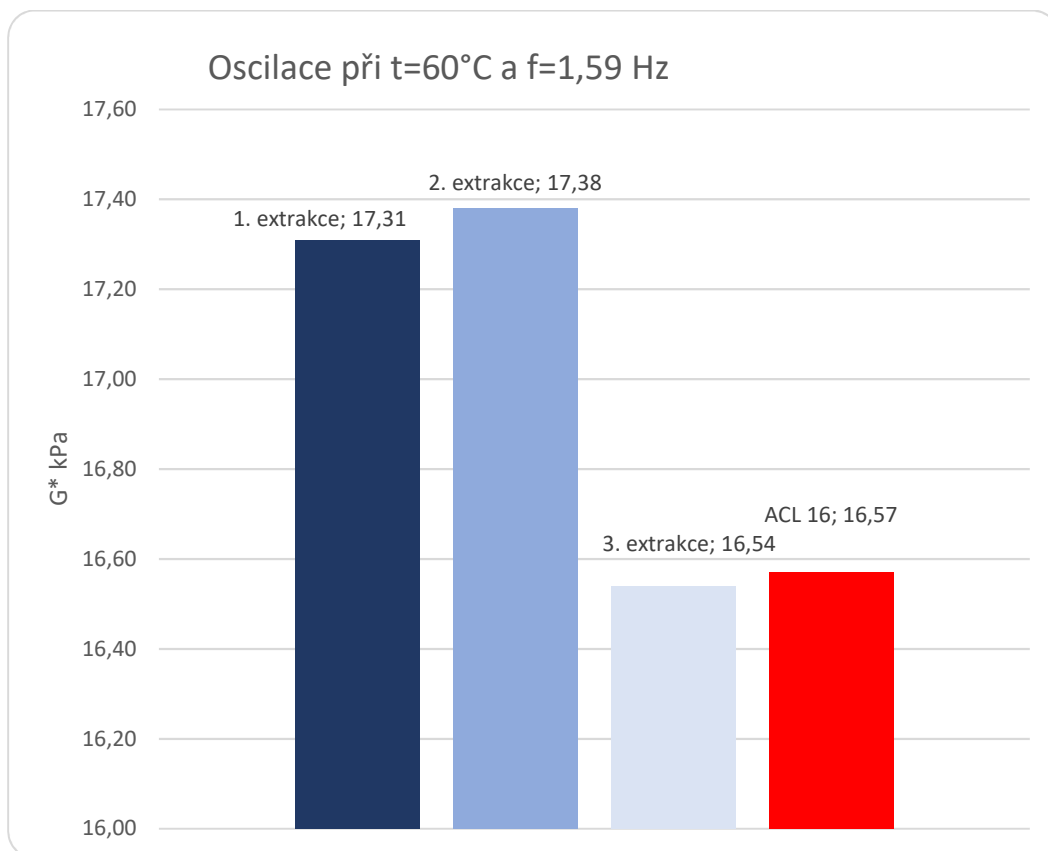


Obr. 6.7 Vrstevnatá struktura pojiva v asfaltové směsi bez R-materiálu

- 1 – Kamenivo
- 2 – Ochráněná vrstva měkčího pojiva
- 3 – Vrstva pojiva vystaveného vlivům výroby

Tento fakt nám pomáhá pochopit výsledky komplexního smykového modulu (graf 6.34) a diagnostiku přítomnosti R-materiálu. První extrakce je výrazně tvrdší než výsledná směs, protože první extrakce definuje nejvíce ovlivněnou vrstvu

z pohledu výrobních procesů. Výsledná směs má v sobě obsaženu i vrstvu ochrannou, proto bude vždy vykazovat měkčí vlastnosti než první extrakce. Tento fakt nám pomáhá vytvořit základní výpočtový vzorec (11) uvedený v kapitole 6.1.2.3.



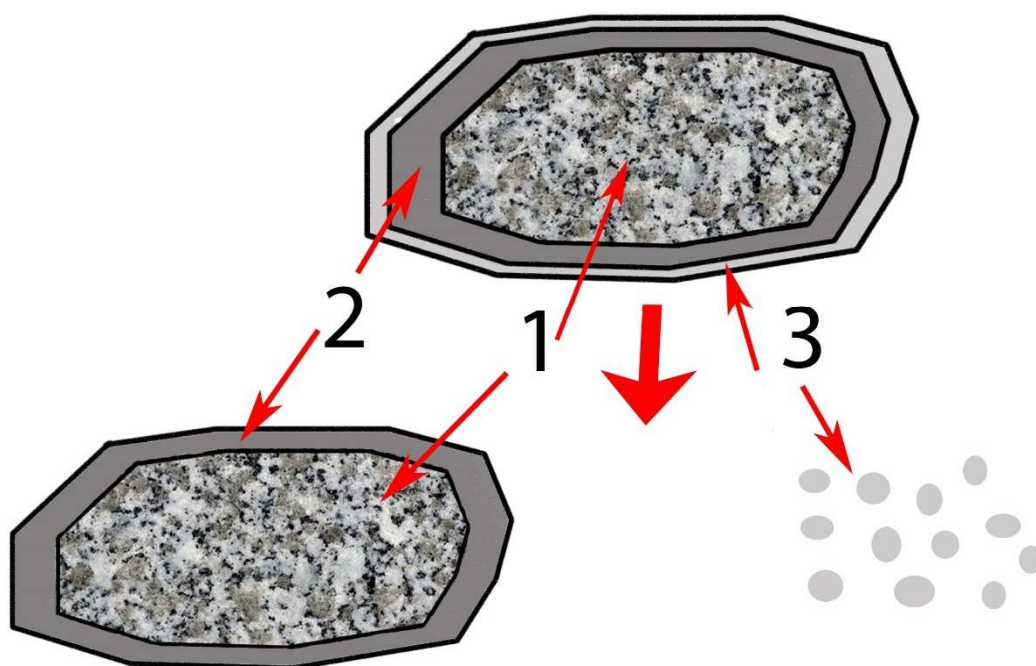
Graf 6.34 Komplexní smykové moduly postupné extrakce ACL 16 a směsi ACL 16 při  $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $f = 1,59\text{ Hz}$

Tato zjištění nám také napomáhají pochopit vlastnosti R-materiálu popsaného v následující kapitole 6.6.2.

### 6.6.2. R-materiál

Pokud připustíme existenci vrstevnaté struktury popsané výše, pak musíme předpokládat, že tato struktura má rozdílné průběhy stárnutí. Vrstva svrchní je vystavena samotnému stárnutí nejvíce, protože v podstatě chrání i vrstvu vnitřní. Vnitřní vrstva naopak ztrácí jen lehké podíly, které částečně pronikají do struktury kameniva.

Zásadní zlom nastane při recyklaci vozovky. Svrchní vrstva je mnohem tvrdší a při drcení se pojivo snáze odloučí a vytvoří složku R-materiálu známou jako mastixový prášek (obr. 6.8). [11]



Obr. 6.8 Princip rozpadu vrstevnaté struktury při recyklaci netuhých vozovek

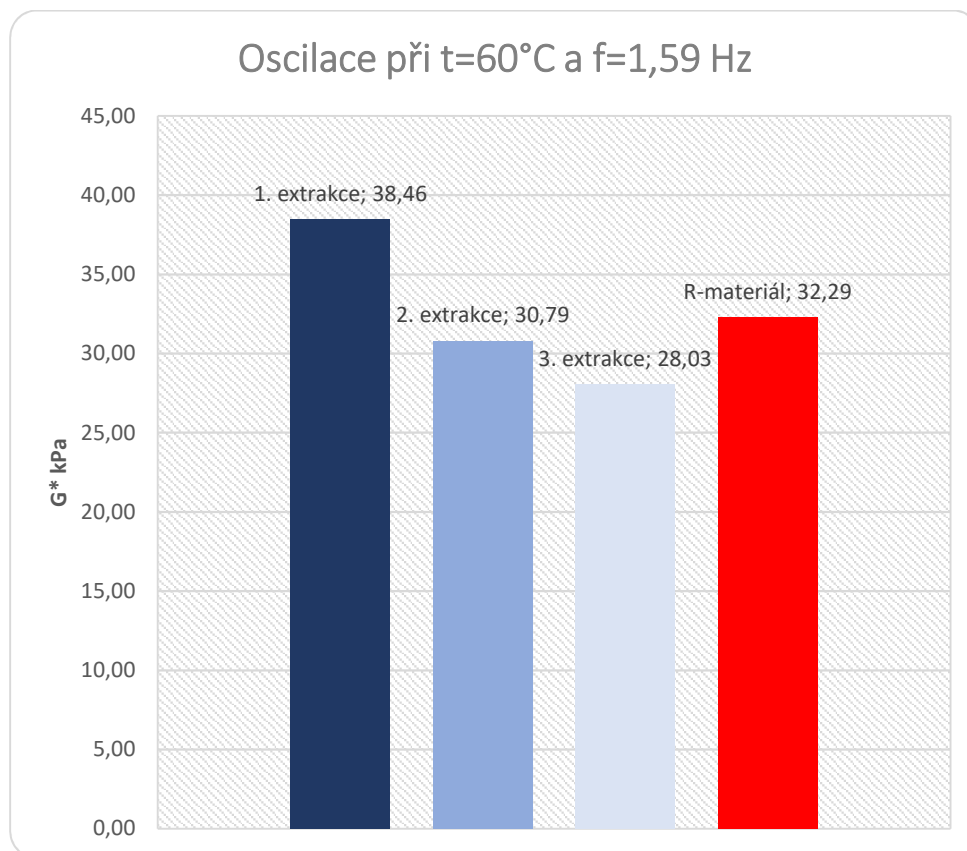
- 1 – Kamenivo
- 2 – Ochráněná vrstva měkčího pojiva (černá skála)
- 3 – Vrstva pojiva vystaveného vlivům výroby (mastixový prášek)

Studie o rozpoznávání R-materiálu v asfaltových směsích [11] se zmiňuje o spoluúčasti asfaltového pojiva R-materiálu v nové asfaltové směsi v přibližně 50–60 %. Zbylé pojivo zůstává na kameni a tvoří černou skálu. Tento mastixový prášek se spolupodílí na promísení asfaltového pojiva R-materiálu s novým pojivem přibližně z 80 %, zbylých 20 % je pojivo uvolněné z černé skály.

Z výsledků komplexního smykového modulu měřeném na postupné extrakci R-materiálu je tento jev částečně patrný (graf 6.35). První extrakce obsahuje



největší podíl mastixového prášku, který se v jemné formě rychle rozpustí, a část černé skály. S následnými extrakcemi podíl mastixového prášku klesá a roste podíl rozpuštěné černé skály (graf 6.35). Výsledný komplexní smykový modul vzorku udává podíl mastixového prášku a černé skály.



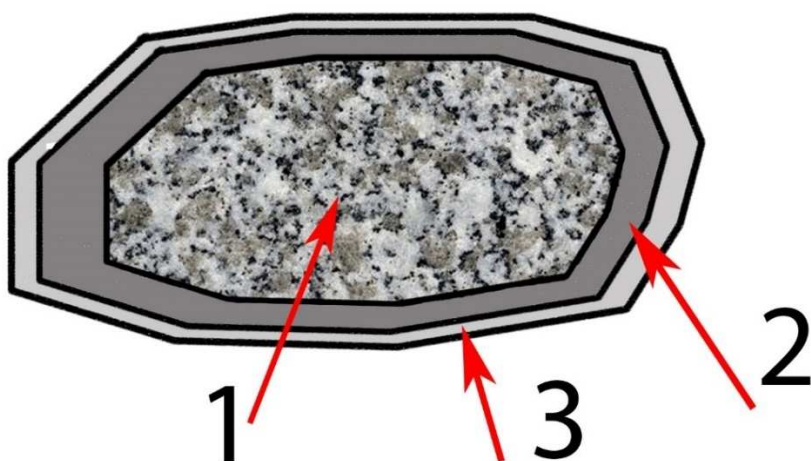
Graf 6.35 Komplexní smykové moduly postupné extrakce R-materiálu a vzorku R-materiálu při  $t = 60^{\circ}\text{C}$  a  $f = 1,59\text{ Hz}$

Předpokládám, že se teorie upřesní při vytvoření asfaltové směsi pouze z R-materiálu. V asfaltové směsi by z volného mastixového prášku vznikla nová asfaltová vrstva, která by obklopila vrstvu černé skály. Tato vrstevnatá struktura by opět šla prokázat postupnou extrakcí.

### 6.6.3. Asfaltová směs s přidaným R-materiálem

Výsledkem je korelace vzniklých struktur. Základní vrstevnatá struktura jak kameniva nového, tak R-materiálu zůstává stejná. Vzniká ovšem nová vnější vrstva, kterou tvoří směs nového pojiva s mastixovým práškem a částí černé skály.

Nové kamenivo je nejprve obklopeno menší vrstvou pojiva zastoupeného spíše novým pojivem. Větší svrchní vrstvu tvoří pojivo nově vzniklé, smísením pojiv R-materiálu a nového pojiva. Takto vzniká podobná struktura jako u směsi bez R-materiálu, ale už s přimísením pojiva R-materiálu (obr. 6.9).



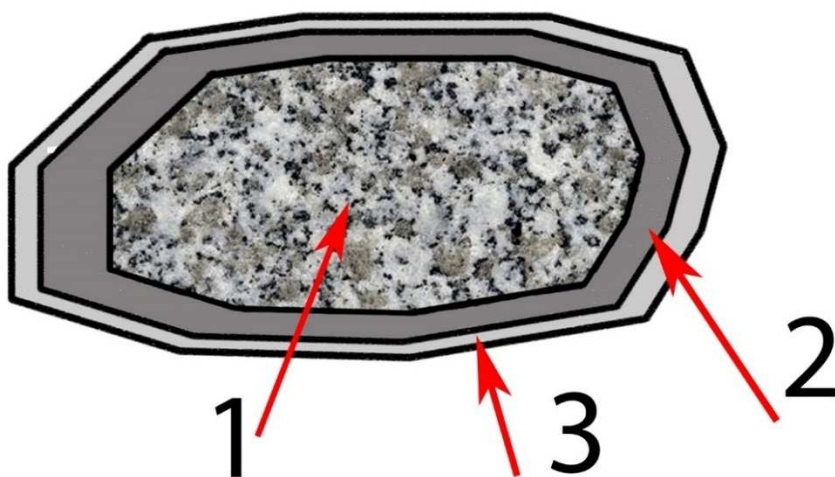
Obr. 6.9 Vrstevnatá struktura nového kameniva v nově vzniklé asfaltové směsi

1 – Kamenivo

2– Ochráněná vrstva měkčího pojiva

3 – Vrstva pojiva vystaveného vlivům výroby (směs pojiv R-materiálu a nového pojiva)

Kamenivo R-materiálu vykazuje podobnou tendenci jako kamenivo nové pouze s rozdílem menší vrstvy nově vzniklé směsi. To si vysvětlují procesem výroby. Během doby, kdy se na novém kamenivu vytvářejí obklopující vrstvy, kamenivo R-materiálu teprve uvolňuje část černé skály. To zpomaluje proces vytváření vrstevnaté struktury. Poslední vrstva definovaná směsí pojiva R-materiálu a nového pojiva je pak výrazně tenčí (obr. 6.10).



Obr. 6.10 Vrstevnatá struktura kameniva R-materiálu v nově vzniklé asfaltové směsi

1 – Kamenivo

2 – Černá skála

3 – Vrstva pojiva vystaveného vlivům výroby (směs asfaltového pojiva R-materiálu a nového)

#### 6.6.4. 1.extrakce

První fáze postupné extrakce definuje první vrstvu vrstevnaté struktury pojiva obklopující kamenivo ve směsi.

Pokud ve směsi není obsažen R-materiál, bude pojivo 1. extrakce tvořeno vrstvou 3 z obrázku 6.7.

Pokud ve směsi je obsažen R-materiál, bude pojivo první extrakce tvořeno směsí nového pojiva a pojiva z R-materiálu (mastixový prášek). Vrstvami 3 na obrázcích (obr. 6.9 a 6.10). V první extrakci bude největší zastoupení nového pojiva.

Toto pojivo bude ze všech extrakcí vykazovat nejměkčí vlastnosti, tedy nejnižší viskozitu a nejnižší komplexní smykový modul. Vrstva definuje nové pojivo ve směsi.

### 6.6.5. 2. extrakce

Jedná se o druhou fázi postupné extrakce. Tato extrakce má zachytit převážně pojivo R-materiálu, které bylo překryto vrstvou první.

Pokud ve směsi není obsažen R-materiál, bude pojivo 2. extrakce tvořeno také vrstvou 3 z obrázku 6.7.

Pokud ve směsi je obsažen R-materiál, bude pojivo druhé extrakce tvořeno směsí dvou pojiv, a to pojivem na novém kamenivu, tedy směsí nového pojiva a pojiva z R-materiálu (mastixový prášek), zobrazeným jako vrstva 3 na obrázku 6.9, a pojivem na kamenivu R-materiálu (černá skála), zobrazeným jako vrstva 2 na obrázku 6.10. Pojivo R-materiálu je v této extrakci dominantní a významně ovlivní tvrdost výsledné směsi pojiv, kterou lze vyčíst z grafů.

Pokud se jedná o směs s obsahem R-materiálu, tato extrakce jej bude definovat.

### 6.6.6. 3. extrakce

Třetí extrakce vykazuje na jedné straně výrazné snížení komplexního smykového modulu a dynamické viskozity, na straně druhé se hodnotami penetrace a bodu měknutí blíží spíše k hodnotám druhé extrakce. Tento rozpor nejsem schopen zcela vysvětlit, ale pokusím se popsat dvě možné teorie.

První teorie pokračuje v myšlence rozpouštění vrstevnatých struktur. Předpokládá, že se jedná o směs dvou pojiv: pojiva R-materiálu (černá skála), zobrazeného jako vrstva 2 na obrázku 6.9, a pojiva ochráněného na povrchu nového kameniva, zobrazeného jako vrstva 2 na obrázku 6.7. Toto ochráněné pojivo je dominantní ve výsledné směsi.

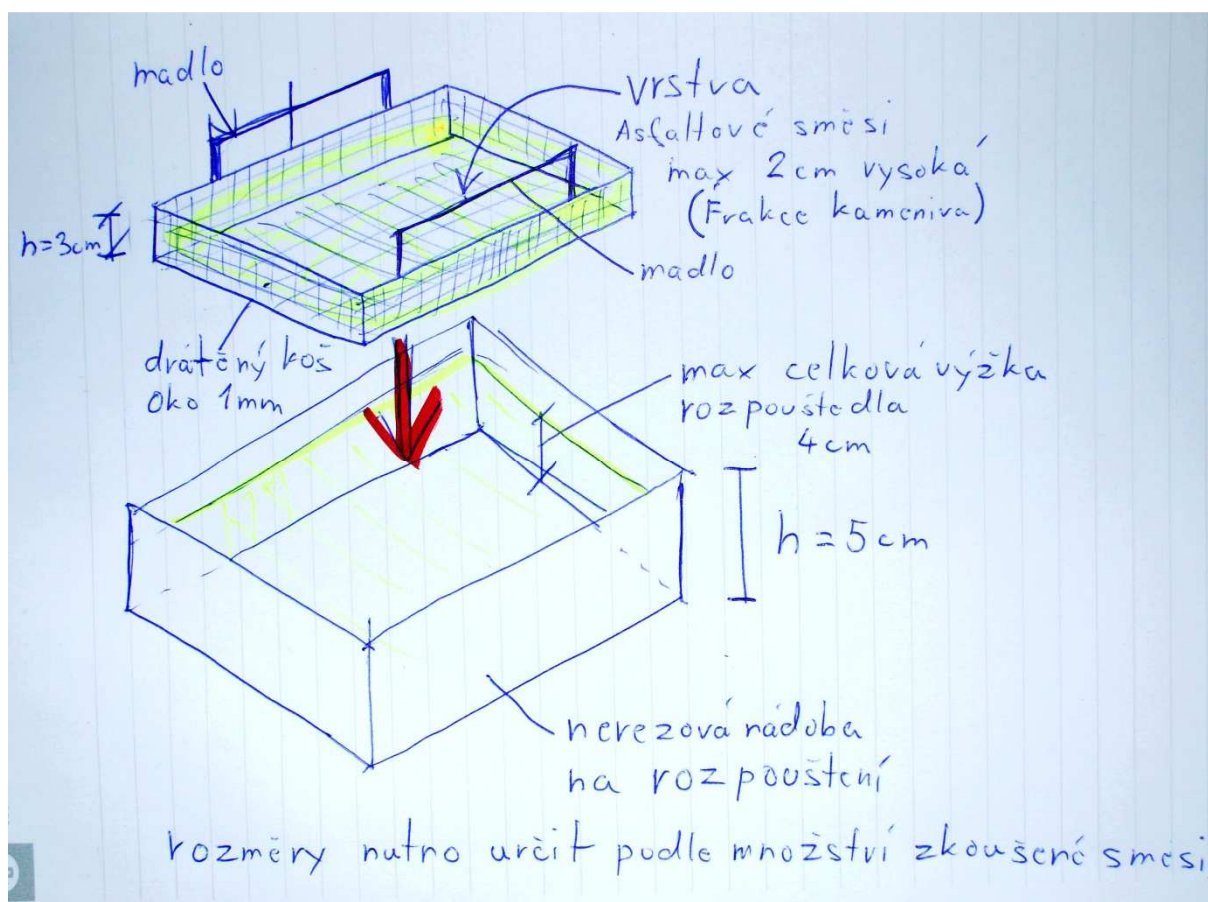
První teorie by vysvětlovala, proč výsledek třetí extrakce u směsi ACL 16; 25 % R-mat vykazuje stejné hodnoty jako první extrakce (graf 6.33). Při snížení podílu R-materiálu by výsledek třetí extrakce klesl pod první extrakci, protože podíl ochráněného pojiva by převážil vliv R-materiálu. To lze částečně ukázat na hodnotě směsi bez R-materiálu (graf 6.33) a (graf 6.35) popsané v kapitole 6.6.2. Při zvýšení podílu R-materiálu se projeví vliv černé skály a převáží vlastnosti ochráněné vrstvy nového pojiva. Hodnota třetí extrakce pak převýší tu z první extrakce. Tento jev je patrný na směsích ACO 11; 50 % R-mat a ACP 16; 40 % R-mat (graf 6.33).

Druhá teorie předpokládá vysokou homogenitu při rozpouštění. Zrna kameniva se při rozpouštění dotýkají velkou plochou sousedících zrn. Tím je zabráněno kontinuálnímu rozpouštění. To se projeví při třetí extrakci, kdy je koš s kamenivem vysypán a precizně promýván.

Takto extrahované pojivo má vysoký podíl pojiva R-materiálu a částečně i podíl pojiva první vrstvy, které bylo uvolněno po vysypání vzorku z rozpouštěcího koše a následným promýváním. Tuto teorii dokazují převážně pomocí výsledků bodu měknutí a penetrace. Dále ji lze podložit následnými výsledky postupných extrakcí, v nichž třetí extrakce u směsí s vyšším obsahem R-materiálu vykazuje výrazně tvrdší charakter.

### 6.6.7. Doporučení změny provádění postupné extrakce

Doporučení je vztaženo k druhému závěru popisu 3. extrakce a snaží se tuto problematiku vyřešit technickou změnou provádění rozpouštění. Navrhuji jiný technologický postup zkoušky postupné extrakce pro eliminaci dotykových ploch kameniva rozpouštěné asfaltové směsi. Návrh spočívá v rozdílném tvaru nádoby pro rozpouštění asfaltové směsi. Cílem je maximalizovat rozpustnou plochu směsi v kontaktu s rozpouštědlem (obr. 6.11).



Obr. 6.11 Návrh rozpouštěcí sestavy pro účely postupné extrakce

## 7 DOPORUČENÍ

Domnívám se, že přesnost metody měření vrstevnatých struktur pomocí postupné extrakce je zásadně závislá na spojitosti doby rozpouštění a velikosti asfaltových vrstev. Uvedu příklad. Když budeme mít směs o malém množství R-materiálu, je potřeba mít první extrakci delší, protože film směsi nového a recyklovaného pojiva bude mnohem větší než film u směsi s velkým obsahem R-materiálu. Abychom zajistili, že v první extrakci bude většina nového pojiva a v druhé většina černé skály, je nutné zohlednit tloušťky filmů jednotlivých vrstev asfaltového pojiva.

Řešením by bylo metodu postupné extrakce opakovat s přihlédnutím k naměřeným hodnotám první postupné extrakce.

V případě, že první postupná extrakce poskytne zjištění malé příměsi R-materiálu, provedeme druhou postupnou extrakci s úpravou délky času první extrakce. Doba rozpouštění první extrakce by byla zvýšena. Předpokládám, že pokud by se vytvořila nová aparatura na rozpouštění podle mého návrhu, druhá extrakce by již nebyla nutná a směs by se mohla rovnou omýt. Tím by se celá metoda zásadně zrychlila.

V případě, že první postupná extrakce poskytne zjištění velkého obsahu příměsi R-materiálu, provedeme opačnou korekci.

Eliminaci jedné extrakce použitím jiné aparatury na rozpouštění předpokládám i u první postupné extrakce. Metodika diagnostiky a výpočtu by touto změnou nebyla ovlivněna.

Určení hodnot korekce časů prvního rozpouštění by vyžadovalo zkoušení na směsích s různým obsahem R-materiálu za předpokladu dosažení co nejlepší shody.

I přes navržené korekce zkušební metody bude metoda vždy podléhat chybovosti, spojené s množstvím navrženého nového pojiva asfaltové směsi.

Rovněž by bylo vhodné ověřit popsanou metodiku na větším souboru asfaltových směsí s různými obsahy R-materiálu.



## 8 ZÁVĚR

Byla provedena analýza zahraničních metod predikujících přítomnost a množství R-materiálu. Z této části byly nejpřínosnějšími zjištěními myšlenka černé skály a existence vrstevnatosti systému asfaltových směsí. Tento vrstevnatý systém je možné rozeznat a vyhodnotit pomocí reologických zkoušek. O toto zjištění se opíraly metody vyvinuté ve studii [11]. Studie dále popsala optickou metodu rozeznání zbytkového filmu R-materiálu na kamenivu po extrakci pojiva.

Při využití obecně používaných zkušebních metod (Stanovení zrnitosti, stanovení objemové hmotnosti a maximální objemové hmotnosti, stanovené mezerovitosti) jsem došel k závěru, že pro predikci přítomnosti R-materiálu v asfaltových směsích, nejsou vhodné.

V rámci této diplomové práce byla vyvinuta funkční metoda prokazující přítomnost R-materiálu v asfaltových směsích a také metoda, schopná odhadnout přibližné množství přidaného R-materiálu v asfaltové směsi (viz kapitola 6.1).

Metodu geologické analýzy lze považovat za ne vždy zcela spolehlivou. Jejím předpokladem je rozdílný typ geologie nového kameniva a kameniva R-materiálu. Tato podmínka ovšem nemusí být vždy splněna (kamenivo R-materiálu může být ze stejného ložiska jako kamenivo nové a pak metoda ztrácí na funkčnosti).

Metodu černé skály (vizuální sledování přítomnosti „přípečených“ zbytků zestárlého asfaltu na povrchu zrn kameniva R-materiálu po extrakci asfaltové směsi) považuji za velmi vhodnou doplňkovou metodu, která velmi spolehlivě odhalí přítomnost R-materiálu před následnou aplikací funkčních a reologických zkoušek na pojiva znovuzískaná při postupné extrakci, a umožní nám předběžnou predikci naměřených výsledků.

Metodu postupné extrakce a její využití a verifikaci považují za zásadní výsledek této diplomové práce. Tato metoda dokáže s jistotou určit, zda je R-materiál v asfaltové směsi přítomen či nikoliv a pomocí vytvořených matematických metod používajících hodnoty komplexního smykového modulu pojiv znovuzískaných z asfaltové směsi při postupné extrakci, určit i přibližné množství R-materiálu. Navržené metody pochopitelně potřebují další rozsáhlé testování a kalibraci, která by mohla výsledky predikce množství R-materiálu v asfaltové směsi zpřesnit.



## 9. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] UNIVERZITA TOMÁŠE BATI VE ZLÍNĚ, Fakulta technologická. *Reologie*. 2011, 17 stran.  
Dostupné z: [http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM\\_03.pdf](http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_03.pdf)
- [2] UNIVERZITA TOMÁŠE BATI VE ZLÍNĚ, Fakulta technologická. *Kinematika*. 2013, 8 stran.  
Dostupné z: [http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env\\_fyzika/EF\\_06.pdf](http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_06.pdf)
- [3] UNIVERZITA TOMÁŠE BATI VE ZLÍNĚ, Fakulta technologická. *Kinematika*. 2010, 6 stran.  
Dostupné z: [http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika\\_pol/FP\\_11.pdf](http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika_pol/FP_11.pdf)
- [4] STOKLÁSEK, Svatopluk. *Nové zkušební metody asfaltových pojiv a směsí umožňující prodloužení životnosti asfaltových vozovek, Zpráva k výzkumnému projektu TA 03030381*. 2014, 101 stran.
- [5] Bc. Michal Pěnčík. *Reologické vlastnosti asfaltových pojiv*. Brno, 2015. 76 s., 81 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
- [6] DAŠEK, Ondřej, COUFALÍK, Pavel, HÝZL, Petr, VARAUS, Michal, ŠPAČEK, Petr, HEGR, Zdeněk a STOKLÁSEK, Svatopluk. *Nové zkušební metody umožňující predikovat prodloužení životnosti asfaltových vozovek*. 2013, 18 stran.
- [7] HUANG, Baoshan, LI, Guoqiang, VUKOSAVLJEVIC, Dragan, SHU, Xiang a EGAN, Brian. *Laboratory Investigation of Mixing Hot-Mix Asphalt with Reclaimed Asphalt Pavement*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2005, 1929, 37–45, [cit. 2018-01-02]. DOI: 10.3141/1929-05. ISSN 0361-1981. Dostupné z: <http://trrjournalonline.trb.org/doi/10.3141/1929-05>
- [8] JUNTAO, Lin a další. *Laboratory investigation of rejuvenator seal materials on performances of asphalt mixtures*. Construction and Building Materials. Volume 37, December 2012, Sv. Non Destructive Techniques for Assessment of Concrete, pages 41–45..
- [9] JUNTAO, Lin a další. *Effectiveness of rejuvenator seal materials on performance of asphalt pavement*. Construction and Building Materials. Volume 55, March 2014, pages 63–68.
- [10] Martin, Amy EPPS a další. *THE EFFECTS OF RECYCLING AGENTS ON ASPHALTMIXTURES WITH HIGH RAS AND RAP BINDER RATIOS. PHASE I INTERIM REPORT*. College Station, Texas: Texas A&M Transportation Institute, March 2015. Prepared for National Cooperative Highway Research Program Transportation Research Board of The National Academies. Project No. 9-58.
- [11] BUTTLAR, W., REBHOLZ, F. E., NASSAR, W. *Detection of Recycled Asphalt Pavement (RAP) in Bituminous Mixtures*, Project IA-H1, FY 02, Report No. ITRC FR 02-2, Illinois Transportation Research Center, 2004, Project No. 1-158.

- [12] ČSN EN 933-1. *Zkoušení geometrických vlastností kameniva-Část 1: Stanovení zrnitosti-Sítový rozbor*. Praha: ČNI, 1998, 12 s.
- [13] ČSN EN 12697-6+A1. *Asfaltové směsi-Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka-Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa*. Praha: ČNI, 2007, 16 s.
- [14] ČSN EN 12697-5+A1. *Asfaltové směsi-Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka-Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti*. Praha: ČNI, 2007, 24 s.
- [15] ČSN EN 12697-8. *Asfaltové směsi-Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka-Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí*. Praha: ČNI, 2004, 12 s.
- [16] ČSN 73 6121. *Stavba vozovek-Hutněné asfaltové vrstvy-Provádění a kontrola shody*. Praha: ČNI, 2008, 36 s.
- [17] ČSN EN12697-3. *Asfaltové směsi-Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka Část 3: Znovuzískávání extrahovaného pojiva: Rotační vakuové destilační zařízení*. Praha: ČNI, 2006, 16 s.
- [18] ČSN EN 1426. *Asfalty a asfaltová pojiva-Stanovení penetrace jehlou*. Praha: ČNI, 2007, 16 s.
- [19] ČSN EN 1427. *Asfalty a asfaltová pojiva-Stanovení bodu měknutí-Metoda kroužek a kulička*. Praha: ČNI, 2007, 16 s.
- [20] DAŠEK, Ondřej, COUFALÍK, Pavel. *Nové zkušební metody asfaltových pojiv a směsí umožňující prodloužení životnosti asfaltových vozovek. Příloha k odborné zprávě o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2013*. 2013, 85 stran.
- [21] ČSN EN 14770 *Asfalty a asfaltová pojiva-Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu-Dynamický smykový reometr (DSR)*. Praha, 2012.
- [22] Bc. STŘASÁKOVÁ Monika. *Stárnutí asfaltových pojiv*. Brno, 2016. 82 stran, 98 s přílohami. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
- [23] ČSN EN 13702 *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení dynamické viskozity modifikovaných asfaltů metodou kužel a deska*. Praha, 2010.
- [24] ČSN EN12697-1. *Asfaltové směsi-Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka Část 1: Obsah rozpuštěného pojiva*. Praha: ČNI, 2006, 52 s.
- [25] Bc. Jan Mastný. *Vliv syntetických vosků a rejuvenátorů na vlastnosti asfaltové směsi s R-materiálem*. Praha, 2017. 78 s., 105 s. příl. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedry silničních staveb. Vedoucí práce Ing. Jan Valentin, Ph.D.

## 10. SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 3.1: Napěťová odezva viskoelastického materiálu při dynamických experimentech [3]  
Obr. 3.2 Napěťová odezva ideálně elastického materiálu při dynamických experimentech [3]  
Obr. 3.3 Časová závislost napětí a poměrné deformace při harmonickém namáhání u viskoelastických materiálů [2]  
Obr. 3.4 Napěťová odezva viskoelastického materiálu při dynamických experimentech [3]  
Obr. 3.5 Porovnání vrstev asfaltového pojiva na kamenivu u směsí s obsahem R-materiálu a bez něj [7]  
Obr. 3.6 schéma postupné extrakce [7]  
Obr. 3.7 schéma vrstevnaté struktury zestárlého asfaltového pojiva obklopující kamenivo [7]  
Obr. 3.8 Vrstevnatá struktura asfaltové směsi s R-materiálem [7]  
Obr. 3.9 Vrstevnatá struktura směsi s přidaným R-materiálem  
Obr. 3.10 Vrstevnatá struktura směsi bez R-materiálu  
Obr. 4.1 Vložení patrony s filtračním papírem do Extraktoru  
Obr. 4.2 Síta připravena pro extrakci asfaltového pojiva extraktorem  
Obr. 4.3 Popis rotačního vakuového destilačního zařízení [17]  
Obr. 4.4 Rotační vakuové destilační zařízení  
Obr. 4.5 Penetrometr  
Obr. 4.6 Přístroj na měření bodu měknutí  
Obr. 4.7 Vzorek pojiva umístěný na geometrii DSR  
Obr. 4.8 Vzorek pojiva umístěný na geometrii DSR po očištění, připravený na měření.  
Obr. 5.1 Naplněná síťová nádoba vpravo, přebytek homogenizovaného vzorku vlevo  
Obr. 5.2 Nádoby na rozpouštění vzorku pro dvě extrakce vlevo, vzorek v síťové nádobě vpravo  
Obr. 5.3 Schéma průběhu postupné extrakce  
Obr. 6.1 Vzorky rozdílného geologického typu kameniva směsi ACL 16; 25 % R-mat (kamenivo R-mat)  
Obr. 6.2 Vzorky podobného geologického typu kameniva směsi ACL 16; 25 % R-mat (nové kamenivo)  
Obr. 6.3 Vzorky kameniva směsi ACO 11 ;50 % R-mat  
Obr. 6.4 Vzorky kameniva směsi ACP 16+ ;40 % R-mat  
Obr. 6.5 Přítomnost černé skály na očištěném kamenivu zleva ACL 16, ACP 16+; 40 % R-mat a R-mat  
Obr. 6.6 Přítomnost černé skály na očištěném kamenivu zleva ACL 16, ACP 16+; 40 % R-mat a R-mat  
Obr. 6.7 Vrstevnatá struktura pojiva v asfaltové směsi bez R-materiálu  
Obr. 6.8 Princip rozpadu vrstevnaté struktury při recyklaci netuhých vozovek  
Obr. 6.9 Vrstevnatá struktura nového kameniva v nově vzniklé asfaltové směsi  
Obr. 6.10 Vrstevnatá struktura kameniva R-materiálu v nově vzniklé asfaltové směsi  
Obr. 6.11 Návrh rozpouštěcí sestavy pro účely postupné extrakce

## 11. SEZNAM TABULEK

- Tab. 6.1 Mezerovitost směsi ACL 16 a ACL 16 25 % R-mat  
Tab. 6.2 Objemová hmotnost směsi ACL 16 a ACL 16 25 % R-mat  
Tab. 6.3 Maximální objemová hmotnost směsi ACL 16, ACL 16; 25 % R-mat a R-mat  
Tab. 6.4 Obsah pojiva referenčních směsí  
Tab. 6.5 Penetrace referenčních směsí  
Tab. 6.6 Body měknutí referenčních směsí  
Tab. 6.7 Penetrace jehlou postupné extrakce a směsí referenčních vzorků  
Tab. 6.8 Posouzení přítomnosti R-materiálu v asfaltové směsi podle výsledků penetrace jehlou  
Tab. 6.9 Body měknutí postupné extrakce a směsí referenčních vzorků  
Tab. 6.10 Posouzení přítomnosti R-materiálu v asfaltové směsi podle výsledků bodů měknutí  
Tab. 6.11 Posouzení přítomnosti R-materiálu v asfaltové směsi podle výsledků komplexního smykového modulu  
Tab. 6.12 Posouzení přibližného množství R-materiálu v asfaltové směsi podle výsledků komplexního smykového modulu

## 12. SEZNAM GRAFŮ

- Graf 3.1 Komplexní smykové moduly jednotlivých vrstev vrstevnatého systému obklopující kamenivo [7]*
- Graf 3.2 Graf kalibrace metody simulace vlivu teploty výroby na asfaltovou směs [11]*
- Graf 3.3 Úbytek hmoty metodou pálení v peci asfaltových pojiv o různém procentuálním zastoupení R-materiálu [13]*
- Graf 3.4 Referenční křivky asfaltových pojiv o různém množství R-materiálu. [11]*
- Graf 3.5 Vložení vlastních dat studie do referenčních křivek [11]*
- Graf 3.6 Referenční křivka pro určení přítomnosti R-materiálu [11]*
- Graf 6.1 Čáry zrnitosti referenčních vzorků*
- Graf 6.2 Srovnání maximální objemové hmotnosti u referenčních směsí (ve vodě)*
- Graf 6.3 Srovnání maximální objemové hmotnosti u referenčních směsí (v tetrachlorethylenu)*
- Graf 6.4 Obsah pojiva referenčních směsí*
- Graf 6.5 Penetrace referenčních směsí*
- Graf 6.6 Body měknutí referenčních směsí*
- Graf 6.7 Komplexní smykové moduly referenčních směsí při teplotě 60 °C*
- Graf 6.8 Komplexní smykové moduly referenčních směsí při  $f = 1,59$  Hz*
- Graf 6.9 Komplexní smykové moduly referenčních směsí při  $f = 1,59$  Hz a teplotě  $t = 60$  °C*
- Graf 6.10 Blackův diagram referenčních směsí*
- Graf 6.11 dynamická viskozita referenčních vzorků*
- Graf 6.12 dynamická viskozita referenčních vzorků při rychlosti otáčení 6,8 m.s-1*
- Graf 6.13 Penetrace jehlou postupné extrakce a směsí referenčních vzorků*
- Graf 6.14 Body měknutí postupné extrakce a směsí referenčních vzorků*
- Graf 6.15 Dynamické viskozity postupné extrakce ACL 16; 25 % R-mat a směsí ACL 16; 25 % R-mat*
- Graf 6.16 Dynamické viskozity postupné extrakce ACL 16; 25 % R-mat a směsí ACL 16; 25 % R-mat*
- Graf 6.17 Dynamické viskozity postupné extrakce a směsí referenčních vzorků při smykové rychlosti 6,8 s-1*
- Graf 6.18 Komplexní smykové moduly postupné extrakce ACL 16 a směsí ACL 16*
- Graf 6.19 Komplexní smykové moduly postupné extrakce R-materiálu a vzorku R-materiálu*
- Graf 6.20 Komplexní smykové moduly postupné extrakce ACL 16; 25 % R-mat a směsí ACL 16; 25 % R-mat*
- Graf 6.21 Komplexní smykové moduly postupné extrakce ACO 11; 50 % R-mat a směsí ACO 11; 50 % R-mat*
- Graf 6.22 Komplexní smykové moduly postupné extrakce ACP 16+; 40 % R-mat a směsí ACP 16+; 40 % R-mat*
- Graf 6.23 Komplexní smykové moduly postupné extrakce ACL 16 a směsí ACL 16 při  $f = 1,59$  Hz*
- Graf 6.24 Komplexní smykové moduly postupné extrakce R-materiálu a vzorku R-materiálu při  $f = 1,59$  Hz*
- Graf 6.25 Komplexní smykové moduly postupné extrakce ACL 16; 25 % R-mat a směsí ACL 16; 25 % R-mat při  $f = 1,59$  Hz*
- Graf 6.26 Komplexní smykové moduly postupné extrakce ACO 11; 50 % R-mat a směsí ACO 11; 50 % R-mat při  $f = 1,59$  Hz*
- Graf 6.27 Komplexní smykové moduly postupné extrakce ACP 16+; 40 % R-mat a směsí ACP 16+; 40 % R-mat při  $f = 1,59$  Hz*
- Graf 6.28 Blackův diagram postupné extrakce ACL 16 a směsí ACL 16*
- Graf 6.29 Blackův diagram postupné extrakce R-materiálu a vzorku R-materiálu*
- Graf 6.30 Blackův diagram postupné extrakce ACL 16; 25 % R-mat a směsí ACL 16; 25 % R-mat*
- Graf 6.31 Blackův diagram postupné extrakce ACO 11; 50 % R-mat a směsí ACO 11; 50 % R-mat*
- Graf 6.32 Blackův diagram postupné extrakce ACP 16+; 40 % R-mat a směsí ACP 16+; 40 % R-mat*
- Graf 6.33 Komplexní smykové moduly postupné extrakce a směsí referenčních vzorků při  $t = 60$  °C a  $f = 1,59$  Hz*
- Graf 6.34 Komplexní smykové moduly postupné extrakce ACL 16 a směsí ACL 16 při  $t = 60$  °C a  $f = 1,59$  Hz*

## **13. SEZNAM MATEMATICKÝCH VZORCŮ**

- (1) Newtonova rovnice [1]
- (2) Hookeův zákon [3]
- (3) Vzorec pro výpočet procentuálního množství jemných částic [12]
- (4) Vzorec na výpočet procentuálního obsahu pojiva v asfaltové směsi [16]
- (5) Objemová hmotnost [13]
- (6) Maximální objemová hmotnost [14]
- (7) Mezerovitost [15]
- (8) Smykové napětí (dynamická viskozita) [20] [23]
- (9) Přítomnost R-materiálu určena z penetrace
- (10) Přítomnost R-materiálu určená z bodů měknutí
- (11) Přítomnost R-materiálu určená z komplexního smykového modulu
- (12) Přibližné množství R-materiálu určené z komplexního smykového modulu